

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**CLAYTON GILNEI MARTINS ROCHA**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DE  
VIBRAÇÃO EM ATUADORES  
ELÉTRICOS.**

Porto Alegre  
2016

**CLAYTON GILNEI MARTINS ROCHA**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DE  
VIBRAÇÃO EM ATUADORES  
ELÉTRICOS.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Renato Ventura Bayan  
Henriques**

Porto Alegre  
2016

**CLAYTON GILNEI MARTINS ROCHA**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DE  
VIBRAÇÃO EM ATUADORES  
ELÉTRICOS.**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada 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. Altamiro Amadeu Susin, INPG  
Doutor em Informática pelo Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG)  
– Grenoble, FRANÇA

Prof. Dr. José Luiz Duarte Ribeiro, UFRGS  
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Rio Grande do Sul, BRASIL

Prof. Dr. Ivan Muller, UFRGS  
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Rio Grande do Sul, BRASIL

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luis Fernando Alves Pereira

Porto Alegre, julho de 2016.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Eldo Rocha e Evangelina Maria Martins Rocha *in memoriun*, e a minha irmã Silma Leni Martins Rocha.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelas condições de saúde física e mental que me permitiram não ter desistido e por ter orientado o caminho.

Agradeço aos meus pais e irmã, pelo suporte ao longo de toda a minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, pela sua atenção e ensinamentos ao longo da minha vida acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRGS - (PPGEE), pela oportunidade.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, por suas contribuições ao longo deste trabalho.

Aos demais colegas do LASCAR - Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica por suas contribuições paralelas, mas de significância, como por exemplo na utilização do LATEX.

## RESUMO

Em sistemas modernos de manutenção inteligente a qualidade de uma máquina ou equipamento depende do suporte que é fornecido junto com esse produto, com a confiabilidade e segurança na utilização do mesmo. Estas exigências, por vezes, não são cumpridas e podem estar indisponíveis em algumas máquinas. Este trabalho descreve uma abordagem utilizando sinais de vibração coletados em tempo real com falhas como estudo preliminar para uma abordagem mais profunda com o estudo da metodologia de testes de vida acelerado para auxiliar durante a fase de vida operacional permitindo ao fabricante a determinação dos ciclos de vida do produto. A abordagem proposta construída em cima de experiências anteriores em desenvolvimento no projeto Integração de Sistemas Inteligentes de Manutenção e Cadeia de Fornecimento de Peças Sobressalentes. O objetivo deste trabalho é apresentar resultados preliminares analisando a variabilidade das assinaturas de falhas das engrenagens danificadas de maneira a permitir a identificação dos ciclos de vida do produto para partes específicas de um atuador elétrico.

**Palavras-chave:** Sistema de manufatura inteligente, engenharia de manutenção, assinatura de falhas, cadeia de suprimentos, teste de vida acelerado.

## **ABSTRACT**

In modern systems of intelligent maintenance the quality of a machine or equipment depends on the support that comes with this product, with the reliability and safety in the use of it. These requirements are sometimes not met and may be unavailable on some machines. This paper describes an approach using vibration signals collected in real-time with faults as a preliminary study for a deeper approach with the study of the methodology of accelerated life tests to assist during the operational life stage allowing the manufacturer the determination of the life cycles of product. The proposed approach built on previous experiences under development in the project Integration of Intelligent Systems of Maintenance and Chain of Supply of Spares. The objective of this work is to present preliminary results analyzing the variability of failure signatures of the damaged gears in order to allow the identification of product life cycles for specific parts of an electric actuator.

**Keywords: Intelligent manufacturing system, Maintenance engineering, Signing failures, Supply chain, Accelerated life test.**

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	10
<b>LISTA DE TABELAS</b>	12
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	13
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	15
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	16
1.1 Necessidade do planejamento da manutenção	16
1.2 Manutenção planejada e preparação para o trabalho	17
1.3 Registros e sistemas de controle de manutenção	17
1.4 Controle de qualidade e melhorias na manutenção	18
1.5 Custos de manutenção	18
1.6 Objetivos	19
1.7 Estrutura do documento	19
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	20
2.1 Manutenção Inteligente	21
2.2 Inovação e desenvolvimento	22
2.2.1 <i>CBM - Condition Based Maintenance</i>	24
2.2.2 <i>MIMOSA</i>	27
2.2.3 <i>OSA-CBM (Open Architecture Sistem - Condition Based Maintenance)</i>	27
2.2.4 IEEE 1451 - Padrão de Interface de Transdutor Inteligente	29
2.2.5 IEEE 1232 - <i>AI-ESTATE, The Artificial Intelligence Exchange and Service Tie to All Test Environments</i>	30
2.3 Projeto Experimental e Análise Estatística	31
2.3.1 Planejamento Fatorial	31
2.3.2 Vantagens no uso do Planejamento Fatorial	31
2.3.3 Erros Experimentais	32
2.3.4 Tipos de Erros	32
2.3.5 Determinação do tamanho da amostra em experimentos	33
2.4 Distribuições de Probabilidades	33
2.4.1 Distribuições discretas mais importantes.	34
2.4.2 Distribuição Binomial	35
2.4.3 Distribuição de Poisson	36
2.4.4 Distribuições contínuas mais importantes.	37
2.4.5 Distribuição Gama Generalizada	37

2.4.6	Distribuição Normal (Gauss) . . . . .	38
2.4.7	Distribuição Weibull . . . . .	40
<b>2.5</b>	<b>Testes de Vida Acelerados - (ALT)</b> . . . . .	<b>45</b>
2.5.1	Tipos de aceleração e estresse de carregamento . . . . .	46
2.5.2	Tipo de carga do esforço aplicado . . . . .	47
2.5.3	Tipos de estresse e níveis de estresse . . . . .	49
<b>2.6</b>	<b>Sinais processados na medição de dados e detecção de falhas</b> . . . . .	<b>50</b>
2.6.1	Análise de medições de som e vibração . . . . .	50
2.6.2	Procedimentos para realizar medições de som e vibração . . . . .	51
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA</b> . . . . .	<b>52</b>
<b>3.1</b>	<b>BRAGECRIM</b> . . . . .	<b>52</b>
3.1.1	Integração de Sistemas de Manutenção Inteligente e Fornecimento de Peças na Cadeia de Suprimentos - (I2MS2C) . . . . .	52
<b>3.2</b>	<b>Proposta da Metodologia</b> . . . . .	<b>53</b>
<b>3.3</b>	<b>Descrição dos equipamentos e banco de dados</b> . . . . .	<b>53</b>
3.3.1	<i>Hardware</i> utilizado . . . . .	54
3.3.2	<i>Softwares</i> utilizados . . . . .	57
<b>3.4</b>	<b>Planejamento dos experimentos</b> . . . . .	<b>58</b>
3.4.1	Visão geral do estudo de caso escolhido . . . . .	58
3.4.2	Descrição do componente selecionado para análise . . . . .	59
<b>3.5</b>	<b>Etapas para preparação e análise de dados</b> . . . . .	<b>60</b>
3.5.1	Escolha do produto . . . . .	60
3.5.2	Planejamento dos ensaios . . . . .	61
3.5.3	Execução dos ensaios . . . . .	61
3.5.4	Coleta dos dados . . . . .	62
3.5.5	Preparação dos dados. . . . .	63
3.5.6	Qualificação dos dados. . . . .	64
3.5.7	Análise dos resultados obtidos . . . . .	64
<b>3.6</b>	<b>Características dos sinais observados.</b> . . . . .	<b>65</b>
3.6.1	Sinais funcionando com peças sem falhas . . . . .	65
3.6.2	Sinais funcionando com peças defeituosas . . . . .	65
<b>3.7</b>	<b>Resumo da Metodologia Proposta</b> . . . . .	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS</b> . . . . .	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Engrenagem cilíndrica padrão - Grupo de sinais: NORMAL A</b> . . . . .	<b>68</b>
<b>4.2</b>	<b>Engrenagem cilíndrica com dentes pouco desgastados - Grupo de sinais: FALHA300A</b> . . . . .	<b>70</b>
<b>4.3</b>	<b>Engrenagem cilíndrica com excessivo desgaste nos dentes - Grupo de sinais: FALHA400A</b> . . . . .	<b>72</b>
<b>4.4</b>	<b>Engrenagem cilíndrica com dente quebrado - Grupo de sinais: FALHA500A</b> . . . . .	<b>74</b>
<b>4.5</b>	<b>Comparações relativas aos sinais analisados</b> . . . . .	<b>75</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>81</b>

<b>APÊNDICE A</b>	<b>INTERFACE LABVIEW® PARA <i>DATALOGGER</i></b>	87
A.1	Árvore estrutural de programação ambiente LabVIEW/NATIONAL™	87
A.2	Abas da estrutura de programação ambiente LabVIEW/NATIONAL™	88
A.3	Diagrama de blocos da programação no ambiente LabVIEW/NATIONAL™	89
<b>APÊNDICE B</b>	<b>ARTIGO -<i>ACCELERATED LIFE TEST FOR INTEGRATION OF SUPPLY CHAIN PLANNING AND INTELLIGENT SYSTEMS</i></b>	90
<b>ANEXO A</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO ATUADOR</b>	96
<b>ANEXO B</b>	<b>MODELAGEM DA VÁLVULA E TUBULAÇÃO</b>	101
B.1	Válvula e Tubulação	101

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Evolução da Manutenção . . . . .	22
Figura 2:	Inovação e estágio de desenvolvimento . . . . .	24
Figura 3:	Diferentes tipos de manutenção . . . . .	25
Figura 4:	Ciclo de vida do produto . . . . .	26
Figura 5:	Sistema de Arquitetura Aberta - Manutenção Baseada em Condição . . . . .	29
Figura 6:	Tipos de distribuições . . . . .	33
Figura 7:	Distribuição Binomial . . . . .	35
Figura 8:	Distribuição de Poisson . . . . .	37
Figura 9:	Distribuição Gama Generalizada, diferentes valores de $\phi$ , $\mu$ e $\alpha$ . . . . .	38
Figura 10:	Distribuição Normal . . . . .	39
Figura 11:	Distribuição Weibull (adaptado) . . . . .	44
Figura 12:	Curva da banheira . . . . .	45
Figura 13:	Porcentagem Cumulativa de Falhas X Tempo . . . . .	47
Figura 14:	Estresse constante . . . . .	48
Figura 15:	Estresse ciclico . . . . .	48
Figura 16:	Estresse por passos . . . . .	48
Figura 17:	Estresse progressivo . . . . .	49
Figura 18:	Estresse randômico . . . . .	49
Figura 19:	BRAGECRIM - Áreas Temáticas - Área Temática 3 . . . . .	53
Figura 20:	Controlador cRIO-9004 <sup>®</sup> / National Instruments <sup>™</sup> . . . . .	54
Figura 21:	Atuador Coester . . . . .	54
Figura 22:	Válvula Proporcional PARKER . . . . .	55
Figura 23:	Disco de frenagem . . . . .	55
Figura 24:	Bancada de testes . . . . .	56
Figura 25:	Engrenagens utilizadas . . . . .	56
Figura 26:	Software LabView <sup>®</sup> / National Instruments <sup>™</sup> . . . . .	57
Figura 27:	Conjunto atuador elétrico-válvula - Coester Ltda . . . . .	59
Figura 28:	Tipos de engrenagens . . . . .	60
Figura 29:	Etapas para preparação e análise de dados . . . . .	60
Figura 30:	Bancada de testes atuador-válvula . . . . .	61
Figura 31:	Engrenagens e características . . . . .	62
Figura 32:	IHM - Interface Homem-Máquina . . . . .	63
Figura 33:	Nomenclatura adotada . . . . .	63
Figura 34:	Exemplo de sinal de vibração amostrado . . . . .	64
Figura 35:	Metodologia passo a passo . . . . .	66
Figura 36:	Exemplos dos sinais de vibrações analisados . . . . .	68
Figura 37:	Exemplos de FFT dos sinais de vibrações analisados . . . . .	69

Figura 38:	FFT dos sinais de vibrações analisados . . . . .	70
Figura 39:	Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - Sinais Grupo FALHA300A	71
Figura 40:	Falhas no domínio do tempo . . . . .	72
Figura 41:	Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA405A . . . . .	73
Figura 42:	Espectro de Magnitude de um lado (rads/amostra) - FALHA405A . .	73
Figura 43:	Função Densidade Probabilidade(PDF) - FALHA403A . . . . .	73
Figura 44:	Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) do grupo de FALHA500 .	74
Figura 45:	Espectro de Magnitude de um lado (rads/amostra) - FALHA506A . .	75
Figura 46:	Função Densidade de Probabilidade de 4 sinais de vibração . . . . .	76
Figura 47:	Comparações entre as análises . . . . .	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Distribuições relacionadas à Confiabilidade . . . . .	34
Tabela 2:	Parâmetros Weibull . . . . .	42
Tabela 3:	Parâmetro $\beta$ - Fator de Forma . . . . .	43
Tabela 4:	Tabela de Resultados . . . . .	67
Tabela 5:	Tabela de Resultados - Grupo NORMAL . . . . .	70
Tabela 6:	Tabela de Resultados - Grupo FALHA300 . . . . .	72
Tabela 7:	Tabela de Resultados - Grupo FALHA400 . . . . .	73
Tabela 8:	Tabela de Resultados - Grupo FALHA500 . . . . .	75
Tabela 9:	Tabela de sinais agrupados . . . . .	77

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	<i>Artificial Intelligence</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
AR	<i>Auto-Regressivo</i>
ATE	<i>Automatic Test Equipment</i>
AU	<i>Abernathy-Utterback</i>
BB	<i>Beta-Binomial</i>
BOL	<i>Beginning-of-Life</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CALT	<i>Calibration Test</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>
COTS	<i>Commercial Off The Shelf</i>
D&MC	<i>Diagnostic and Maintenance Control</i>
EMV	Estimadores de Máxima Verossimilhança
EOL	<i>End-of-Life</i>
ESTATE	<i>Exchange and Service Tie to All Test Environments</i>
f.d.p.	Função Densidade de Probabilidade
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FM	<i>Fisher Matrix</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GCAR	Grupo de Controle, Automação e Robótica
GG	<i>Função Gama Generalizada</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>

IMS	<i>Sistemas Embarcados de Manutenção Inteligente</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	<i>Information Technology</i>
I2MS2C	<i>Intelligent Maintenance Systems and Spare Parts Supply Chains</i>
K-M	<i>Estimador de Kaplan-Meier</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LRB	<i>Limites de Confiança da Razão de Verossimilhança</i>
MIMOSA	<i>Machinery Information Management Alliance Open System</i>
MA	<i>Média Móvel</i>
MED	<i>Método de Fileiras Médias</i>
MLE	<i>Estimador de Máxima Verossimilhança</i>
MTTF	<i>Mean Time to Failure / Tempo Médio até a Falha</i>
MOL	<i>Middle-of-Life</i>
NLRR	<i>Regressão Não Linear</i>
O&M	<i>Organization and Methods</i>
OSA	<i>Open System Architecture</i>
PPGEE	<i>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica</i>
RN	<i>Rede Neural</i>
RRX	<i>Regressão em X</i>
RRY	<i>Regressão em Y</i>
RUL	<i>Remaining Useful Life</i>
SRM	<i>Método de classificação padrão</i>
STIM	<i>Smart Transducer Interface Module</i>
TEDS	<i>Transducer Electronic Data Sheet</i>
TII	<i>Transducer Independence Interface</i>
TTF	<i>Time to Failure / Tempo até a Falha</i>
UA	<i>modelo Albernathy-Utterback</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
v.a.	<i>Variável Aleatória</i>
VI	<i>Interface Virtual</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Parâmetro de locação
$\lambda$	Parâmetro de escala
$\theta$	Parâmetro de localização da distribuição
$\eta$	Parâmetro de escala de vida
$t_0$	Tempo mínimo de vida ou confiabilidade intrínseca
$\beta$	Fator de forma
$\sum$	Somatório
$\omega$	Parâmetro assintótico
$\Upsilon$	Parâmetro de posição

# 1 INTRODUÇÃO

Durante vários anos foram construídas máquinas e equipamentos sem que fosse dada importância a manutenção que essas exigiam no seu ciclo de vida. Conforme (PINTO, 1986) alguns fatores colaboram para os efeitos negativos na eficiência da manutenção, como por exemplo:

1. Análise insuficiente durante a fase de utilização;
2. Aquisição dos equipamentos na base do menor custo sem considerar os custos de manutenção no ciclo de vida;
3. Aquisição de equipamentos sem especificação dos serviços e materiais adequados a sua manutenção (peças de reserva, ferramentas especiais, assistência técnica e formação de pessoal);
4. Avaliação deficiente, por parte dos gestores industriais e outros responsáveis, da real importância da manutenção;
5. Planejamento deficiente da manutenção e execução incorreta de orçamentos de manutenção;
6. Formação insuficiente para o pessoal de manutenção para além dos conhecimentos básicos;
7. Formação insuficiente dos quadros superiores e gestores de manutenção.

A produção de máquinas e equipamentos, provocados pelos crescimentos demográficos e econômicos, aumentou a importância no desenvolvimento qualificado dessas máquinas. Ocorre que o desenvolvimento de pessoal para manutenção não acompanhou essa velocidade.

Após algumas crises econômicas, houve um viés na forma de produção: a automação ganhou um grande destaque, houve cada vez mais o aumento nos custos de produção, custos dos materiais, peças de reserva e também elevados custos quando na ocorrência de paradas de máquinas e produção. Os leiautes das empresas tornaram-se obsoletos e estáticos. As manutenções precisavam ser controladas, otimizadas e planejadas.

## 1.1 Necessidade do planejamento da manutenção

A redução dos tempos de paragem é um dos destaques para o planejamento da manutenção. Mesmo em indústrias pouco complexas, essas paradas podem representar grandes perdas. A racionalização dos equipamentos fabris faz com que normatizações sejam

adotadas assim peças e componentes podem ser empregados em diversas máquinas o que diminui ou racionaliza a ideia de peças de reposição ou até mesmo a quantidade de permanência destas nos setores de manutenção. O aperfeiçoamento constante da mão de obra e sua conseqüente especialização também fazem parte dessa necessidade de planejamento.

Com a melhoria na eficiência dos equipamentos e a diminuição no número de trabalhadores devido a sofisticação nas máquinas também houve a necessidade do aperfeiçoamento do trabalhador da manutenção para que esse pudesse ser mais eficiente em suas atividades.

A duração das máquinas, sua vida útil é outro motivo para o planejamento da manutenção: a substituição de uma máquina deve ocorrer por necessidades de aumento de produção, oportunidades econômico-financeiras, modificações nos tipos ou modelos de produtos produzidos e não por algum tipo de avaria ou inoperância.

Quando ocorrem custos com improvisação, ou até mesmo a falta de uma ferramenta para operação e/ou manutenção, podem agregar excessivos custos ao preço final de um produto. Em alguns casos até inviabiliza-lo para o mercado.

A ideia de racionalização dos equipamentos, citada anteriormente, deve colaborar para evitar a formação de estoques e variedades de peças necessárias para substituição. Em alguns casos a substituição de uma máquina por outra com novas tecnologias colocaria todas as peças estocadas, mesmo sem uso, como obsoletas, o que caracterizaria um desperdício.

## **1.2 Manutenção planejada e preparação para o trabalho**

As atividades de manutenção planejada estão associadas as diversas manutenções relativas a inspeções periódicas, lubrificações e limpezas, entretanto o planejamento da manutenção abrange todas as atividades desde o próprio planejamento, controles e registros para manter uma determinada instalação ou equipamento em funcionamento. Essas atividades podem ser classificadas de várias formas como : manutenção preventiva, corretiva, revisões gerais, substituições programadas, fornecimento de peças de reserva, trabalhos de oficina, planificação de reparações, registros de históricos.

Numa manutenção planejada, o tempo dispendido em trabalhos de emergência, não previstos, reduz tempos na produção e agregam custos aos produtos finais. A forma tradicional da manutenção elabora rotinas de trabalho a efetuar de acordo com uma periodicidade pré-estabelecida pelas informações dadas por fornecedores ou pela observação em campo ou qualquer outra forma factível.

A preparação para o trabalho descreve as necessidades de mão de obra local, a complexidade dos equipamentos, a preparação de equipes, as ordens de trabalho, os valores envolvidos e muitos outros fatores de acordo com o tipo de ambiente de trabalho e a região de execução.

## **1.3 Registros e sistemas de controle de manutenção**

Os controles podem estar embarcados nos próprios equipamentos ou localizados em controladores paralelos ao processamento destes, armazenando as informações em alguma mídia digital. As informações devem ser de forma simples, clara e de fácil acesso, e os controles utilizados devem permitir a comparação de custos de manutenção entre equipamentos similares, e devem permitir a identificação de equipamentos que necessitam de substituição, cálculos para consumo de peças de reserva e identificação da variação

da produtividade, entre outros. Os principais registros contém um histórico das manutenções, rotinas de manutenção, revisões gerais, rotinas de lubrificação, etc.

Os sistemas de controle devem considerar que existe uma relação colaborativa entre os operadores de máquinas e/ou equipamentos e que os equipamentos, materiais, insumos, ferramentas e pessoal por execução estejam disponíveis na hora e no local exato. A utilização de equipamentos normatizados tem uma grande importância para o planejamento dos trabalhos visto que, com grande volume de máquinas e equipamentos é possível viabilizar a existência de alguma peça sobressalente para possíveis trocas e substituições.

## **1.4 Controle de qualidade e melhorias na manutenção**

A aplicação de controles de qualidade em manutenção são úteis para a montagem e desmontagem de acordo com as instruções do fabricante, a substituição do maior número possível de componentes sujeitos a desgaste, a recolocação do equipamento em serviço, testes dos componentes retirados de acordo com tolerâncias e especificações recomendadas.

A manutenção também é um processo que encontra-se em permanente evolução, assim existem algumas melhorias que sistematicamente podem ser efetuadas, como por exemplo: a formação de pessoal para diagnósticos e análise de equipamentos, aperfeiçoamento dos conceitos de manutenção autônoma, etc.

## **1.5 Custos de manutenção**

O controle dos custos de manutenção deve ser realizado de forma que possa ser distribuído adequadamente entre todos os departamentos que utilizam os serviços. Deve também permitir a distinção entre custos de manutenção, custos de construção, custos de melhorias. Outro fator importante é a comparação entre os custos reais e os custos orçados bem como a elaboração de futuros orçamentos. A divisão destes custos por setores ajuda a identificar a evolução bem como um melhor aproveitamento na divisão de verbas entre os setores.

Os métodos de apuramento de custos relacionam-se a salários, gastos gerais, custos de materiais e transporte. Em algumas empresas podem ser distribuídos em vários setores, como departamento pessoal, contabilidade geral ou acumuladas em um departamento técnico específico. Os custos de manutenção tendem a aumentar de acordo com o grau de complexidade de uma fábrica, por exemplo, empresas com elevado índice de manutenção, também em empresas com altos níveis de segurança.

Ainda conforme (PINTO, 1986), os custos para implantação de um sistema de manutenção em uma nova fábrica situam-se entre 0,2% até 2,0% de acordo com o tipo de instalação em uma fábrica. Um projeto de investimento deve incluir as atividades de manutenção, circuitos de informações e documentação técnica, que permita uma normatização para viabilizar uma manutenção necessária e fácil.

Para a implantação de um sistema de manutenção, vários fatores podem ser descritos, como por exemplo, a análise dos custos da assistência técnica dada pelos fornecedores de máquina e equipamentos, o estudo da eficácia na operação e manutenção, o estudo do sistema de planejamento de controle da manutenção, a confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos, estudos sobre as necessidades de peças de reserva, estudos sobre os sistemas de informações, e perspectivas de cooperação local entre empresas e entidades.

Técnicas de vigilância e controle dos equipamentos pode ser obtido através do con-

trole dos desgastes dos equipamentos, utilizando métodos como a análise de vibrações, os ensaios automáticos, registros automáticos de avarias e diversas aparelhagens de controle de variáveis de funcionamento.

## **1.6 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo analisar as assinaturas das engrenagens danificadas e avaliar a sua variabilidade com vista a permitir possíveis contribuições que permitam a identificação e falhas e uma possível predição do comportamento destes componentes.

## **1.7 Estrutura do documento**

Este documento está dividido em cinco capítulos que são resumidos a seguir: este Capítulo 1 (Introdução) descreve as condições iniciais e orientações sobre os demais capítulos. O Capítulo 2 (Fundamentos Teóricos) descreve as tecnologias utilizadas e outras informações para que o leitor possa entender o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 3 (Metodologia Proposta) seguem os passos e informações adotados para o desenvolvimento técnico e teórico do projeto. No Capítulo 4 (Simulações e Resultados) são apresentadas as simulações realizadas bem como os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 5 (Conclusão) são descritas as conclusões obtidas sobre este trabalho realizado.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Desde a grande Revolução Industrial compreendida no período entre 1760 e 1840, com a mudança nos processos de manufatura e a fabricação de produtos em escala, a manutenção era vista como uma perda de tempo nos processos e ela era baseada praticamente no modelo de manutenção corretiva, onde somente após a quebra, parada, atrasos ou ociosidade de uma máquina é que seria dada atenção a essa máquina com a subsequente troca de peças, lubrificações, etc. (AFFONSO, 2002)

Através de diversos estudos e pesquisas realizadas ao longo dos anos foram mostrados que os custos de manutenção poderiam ser minimizados pela modificação da forma como era vista a manutenção, a mudança desse paradigma representava redução de custos e por isso fora aceita pelas empresas em todo o mundo. A forma anterior de tratar a manutenção de forma reativa estaria sendo substituída por novas técnicas que tratavam a manutenção de forma proativa. Técnicas de manutenções preventivas foram adotadas para a melhoria e o aperfeiçoamento nos processos produtivos, essas técnicas criaram rotinas de manutenção, mas mesmo essas técnicas continuavam tratando a manutenção de forma reativa. Em alguns casos ocorre a substituição de peças por períodos pré-estabelecidos de acordo com o fabricante dos equipamentos ou planos de manutenções realizados pelas empresas. Mesmo essas técnicas mantendo os equipamentos em funcionamento por um período mais prolongado elas implicam em custos elevados pois substituem peças ainda em funcionamento e ocupam mão de obra especializada. (REIS; ANDRADE, 2009)

As estratégias preditivas e proativas, por sua vez, são aplicadas em menor número, em comparação à corretiva. Isso se deve, principalmente, ao fato de que estas estratégias são mais onerosas e voltadas para os equipamentos mais críticos dentro de um processo industrial. Ambos os cenários de manutenção (corretiva e preventiva) são extremamente dispendiosos. Deve-se observar que as máquinas podem falhar de modo repentino, antes da ocorrência da operação de manutenção programada, colocando em risco os equipamentos e seres humanos envolvidos com o processo de produção. (GONÇALVES, 2011)

Com o crescente desenvolvimento e complexidade dos processos industriais, a centralização do controle de falhas em processos levou inicialmente a um aumento no interesse do desenvolvimento da engenharia de manutenção, com o aperfeiçoamento da mão de obra e o desenvolvimento de equipamentos com monitoramento, identificação e diagnósticos de falhas e desgastes.

Nos últimos anos, a crescente complexidade das plantas de processo e outros sistemas da engenharia alargou o âmbito de interesse em engenharia de controle, que antes era focada no desenvolvimento de controladores de critérios de desempenho especificados como a estabilidade e precisão.

Sistemas industriais modernos exigem uma maior demanda de confiabilidade do sistema, segurança e baixo custo de operação, que por sua vez implicam em algoritmos de

detecção de falhas e isolamento mais precisos e eficientes. (LO; WONG; RAD, 2006)

O desenvolvimento de novas tecnologias de automação exigiu cada vez mais a utilização de tecnologias modernas, precisas, e de baixa manutenção.

## 2.1 Manutenção Inteligente

No mercado competitivo global de hoje, há uma pressão intensa por indústrias de manufatura para redução e eliminação contínua de custos, do tempo de inatividade não programado e de avarias inesperadas.

Com o advento da Internet e tecnologias livres e inter-relacionáveis, as empresas necessitam de mudanças dramáticas na transformação das tradicionais práticas de manutenção *fail and fix (FAF)* para a metodologia de manutenção *predict and prevent (PAP)*. *E-maintenance* aborda as necessidades fundamentais de ferramentas de inteligência preditiva para monitorar a degradação ao invés de detectar as falhas em um ambiente de rede e, em última análise, para otimizar a utilização dos ativos na instalação. Muitos sensores sofisticados são capazes de fornecer dados sobre o estado e o desempenho da máquina.

O prognóstico inteligente é definido como uma abordagem sistemática que pode continuamente monitorar a degradação do estado operacional e extrapolar o comportamento temporal por meio de indicadores da degradação de variáveis de interesse. Essas podem prever riscos de um comportamento inaceitável ao longo do tempo, bem como identificar exatamente quais componentes de uma máquina tendem a falhar. Ferramentas de avaliação de desempenho e de previsão, são introduzidas pela avaliação contínua e predição de desempenho de um determinado produto, em última instância, permitem a manutenção pró-ativa para evitar as avarias, sua quebra e eventual interrupção do processo em que uma máquina se insere. (LEE, 2003)

Desde a revolução industrial a manutenção dos equipamentos em engenharia tem sido um desafio significativo. Embora um impressionante progresso tenha sido feito com relação à efetividade da manutenção, o desafio permanece, devido a fatores como complexidade, custo e competição entre fabricantes. (DHILLON, 2002)

Além do desenvolvimento dos materiais, durante os últimos anos ocorreu um grande avanço também no desenvolvimento de softwares e aplicativos que permitiram um avanço nessa área de manutenção. Em alguns casos a inclusão de diversos sensores permite a avaliação de mais de um tipo de estresse em uma máquina ou equipamento. Considera-se atualmente manutenção inteligente todo o processo desde a fabricação de um equipamento, passando pela utilização, preparação da mão de obra dos usuários e daqueles que executarão as tarefas efetivas de manutenção.

Na Figura 1 de (SILVA; CAVALCANTE; VIRGÍNIO, 2010) observa-se a evolução da manutenção até os dias de hoje.

O objetivo de um sistema de manutenção inteligente é realizar a migração dos sistemas tradicionais de manutenção corretiva e preventiva para um sistema preditivo, com base no estado de operação e na degradação dos equipamentos. Se os dados disponíveis forem continuamente monitorados e analisados, aplicando-se técnicas de processamento de sinais, pode-se prever qual componente de uma máquina provavelmente irá falhar e quando isto irá ocorrer, reduzindo drasticamente o tempo de parada para manutenção. (LAZZARETTI, 2012)

Devido a essas transformações tecnológicas nas plantas industriais, passou-se a exigir novos requisitos para garantir um nível elevado de eficiência no processo produtivo. Surge uma nova estratégia para realização da manutenção, a estratégia de manutenção

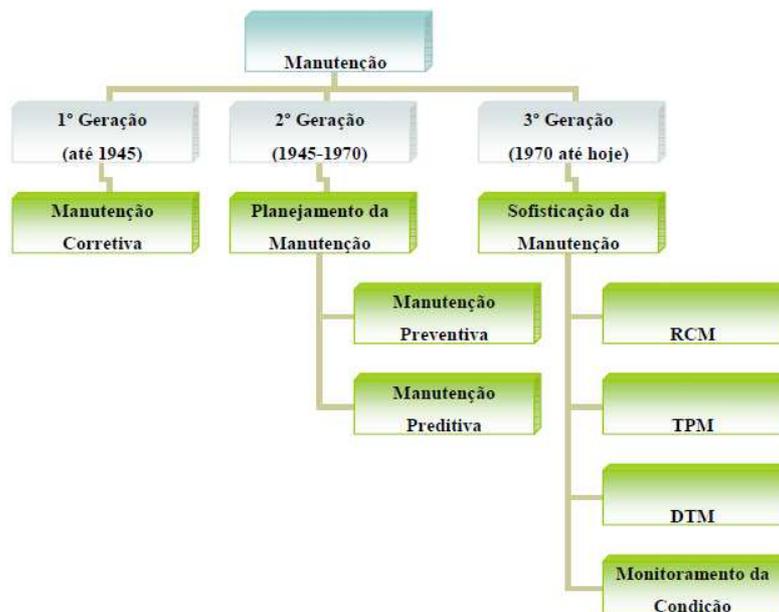


Figura 1: Evolução da Manutenção  
(SILVA; CAVALCANTE; VIRGÍNIO, 2010)

proativa, que também, é conhecida como manutenção inteligente. (LEE et al., 2006)

No entanto, devido a essa exigência do mercado, esses equipamentos industriais passaram a ser mais complexos, sofisticados e totalmente interligados entre si, portanto mais suscetíveis a falhas. Devido a isso, estratégias de gerenciamento de manutenção passaram a ser mais exigidas. Utilizando apenas as estratégias de manutenção tradicionais como a corretiva ou preventiva, as equipes de manutenção não têm conseguido atingir resultados satisfatórios para melhorar os índices de produtividade e disponibilidade do processo produtivo. (BOSA, 2009)

Conforme (LEE, 2003), a manutenção proativa é viabilizada pelo uso de sistemas embarcados, que monitoram os equipamentos da planta industrial remotamente, fazendo a aquisição de sinais indicativos da condição de funcionamento, analisando e processando as informações que possibilitam evoluir da estratégia de manutenção preditiva para a proativa.

## 2.2 Inovação e desenvolvimento

No cenário econômico atual, com o paradigma do triângulo: mudança, criatividade e inovação, os hábitos e costumes sociais se relacionam com produtos de alto valor tecnológico agregado. Com as diversas crises econômicas que se apresentam em todo o cenário mundial, a necessidade de mudanças com a diminuição de custos exige cada vez mais criatividade por parte das empresas, dos pesquisadores e dos desenvolvedores de produtos.

A inovação permite que profissionais técnicos, engenheiros, servidores administrativos, economistas e outros profissionais, formem um grupo heterogêneo integrados. Os planos de investimento andam cada vez mais restritivos, obrigando uma otimização em desenvolvimento de produtos e pesquisas e diminuindo cada vez mais os custos em desenvolvimento, produção e manutenção.

Nesse cenário o compartilhamento de informações e pesquisas diminui etapas de desenvolvimento, a padronização de peças e equipamentos permite a integração entre sistemas desenvolvidos por empresas ou grupos empresariais localizados em diferentes partes do mundo, o que permite que as empresas e usuários dessas tecnologias não fiquem dependentes de alguma empresa, ou até mesmo algum país específico.

A inovação é vista como um elemento extremamente importante na competição corporativa e esse tema tem tido uma considerável atenção nas pesquisas atuais. Entre as pesquisas existentes, o modelo Abernathy-Utterback (modelo UA), é um modelo representativo. Este modelo mostra que muitas inovações dos produtos ocorrem a partir de sua fase inicial no momento de sua criação. Após a tecnologia de criação, há uma tendência de ocorrerem inovações nos processos e também nos produtos. (AKIIKE, 2013)

A base para o entendimento entre as relações mútuas de inovação, estratégia e estado de desenvolvimento de processos deve ser observada através de duas frentes diferentes:

- uma que lida com o ambiente competitivo em que as empresas estão inseridas e comprometidas, o que maximiza a necessidade de seu desempenho em vendas e/ou também na minimização de custos,
- a outra frente analisa a relação entre o desenvolvimento das características do processo de produção de uma empresa e o tipo de atividade inovadora que ela se compromete.

A ideia sugere que a inovação pode ser desenvolvida tanto no quesito de produtos quanto em modelos de processos.

Conforme (UTTERBACK; ABERNATHY, 1975) a natureza da inovação pode ser vista em duas frentes:

- **No modelo de processos:** Um processo de produção é o sistema de equipamentos de processamento, força de trabalho, especificações de tarefas, insumos materiais, trabalho e fluxos de informação, etc., que são empregados para produzir um produto ou serviço.

A ideia básica é que como um processo de produção se desenvolve ao longo do tempo em direção a níveis de produtividade melhorando a saída, ele faz isso com um padrão evolutivo característico: torna-se mais capital intensivo, a produtividade do trabalho direto melhora através de uma maior divisão do trabalho e especialização, o fluxo de materiais dentro do processo leva em mais qualidade de fluxo de linha, o design de produto torna-se mais padronizado, e a escala do processo torna-se maior.

- **No modelo de produtos:** A inovação de produto é uma nova tecnologia ou combinação de tecnologias introduzidas no mercado para atender a um usuário ou uma necessidade de mercado.

A relação entre os segmentos de desenvolvimento e inovação podem ser vistas na Figura 2, onde as taxas de frequência da inovação de produtos e processos são demonstradas no eixo vertical e o conseqüentemente o desenvolvimento de produtos e as fases de processos são demonstradas no eixo horizontal.

Observa-se uma evolução ordenada do produto e do processo de desenvolvimento que pode representar uma padronização e aumento no volume de vendas. As maiores taxas de

melhoria da produtividade progredem rapidamente através das fases indicadas, mas isso não é regra geral pra todos os segmentos de processo.

A evolução tecnológica poderá reduzir a interdependência entre a mudança de produto e processo e alterar o padrão que aparece na Figura 2.

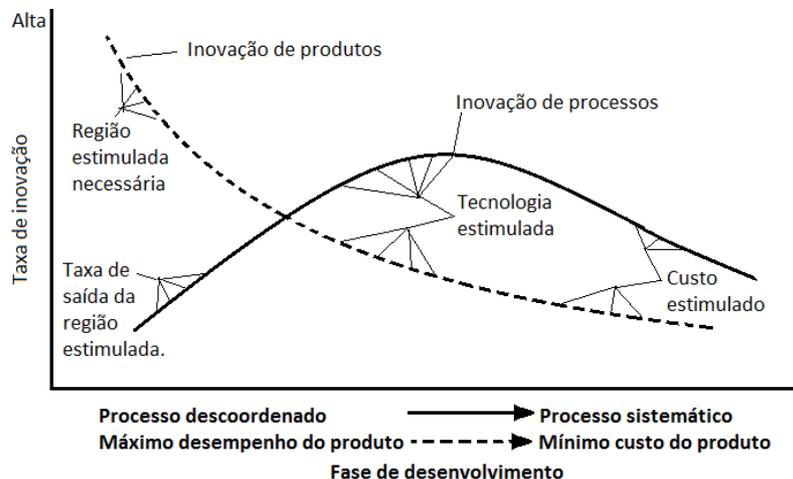


Figura 2: Inovação e estágio de desenvolvimento (Modificado) (UTTERBACK; ABERNATHY, 1975)

### 2.2.1 CBM - Condition Based Maintenance

Manutenção com base na condição (CBM) é um método utilizado para reduzir a incerteza das atividades de manutenção, e é levada ao extremo de acordo com a necessidade indicada pela condição do equipamento. CBM assume que os parâmetros de prognóstico indicativos existentes podem ser detectados e usados para quantificar a possível avaria do equipamento antes que ela realmente ocorra. Os parâmetros dos prognósticos fornecem a indicação de potenciais problemas e falhas incipientes que fariam com que o equipamento ou componente se desviassem de um nível de desempenho aceitável.

Na manutenção, problemas comuns de equipamentos são o envelhecimento e a deterioração. As condições dos equipamentos fornecem indicadores importantes de possíveis falhas e problemas em potencial antes da falha catastrófica ou que danos ao equipamento ocorram. A tendência da deterioração de componentes críticos também podem ser identificados através de uma análise de tendência dos dados relativos ao estado do equipamento. Decisões de manutenção dependem muito de anormalidades reais medidas e falhas incipientes, e de uma previsão da tendência de deterioração do equipamento. (YAM et al., 2001)

Entre os vários conceitos que encontramos na literatura sobre Manutenção Baseada em Condições (CBM) pode-se considerar que essa é a intervenção em um sistema para manutenção quando for realmente necessário. Essa manutenção prevê um acompanhamento dos indicadores de funcionalidade do equipamento e a manutenção ocorrerá somente quando a percepção na deterioração do equipamento indica que ele irá falhar. Estes conceitos são aplicáveis em sistemas críticos que contém redundância e seu funcionamento e possuem relatórios de falhas, mas mesmo sistemas que não possuem essas características também podem se utilizar desses conceitos.

A CBM é baseada na utilização dos dados disponíveis em tempo real ou *offline*, priorizando os recursos de manutenção e otimizando seus custos através da monitorização

das condições de uma máquina ou equipamento. Por exemplo, a Petrobras utiliza aplicativos baseados nas últimas 500 medidas de abertura e fechamento dos atuadores, após o registro, avalia as condições de funcionamento destes.

Com a evolução tecnológica nos últimos anos foi possível o desenvolvimento de uma variedade de equipamentos de instrumentação, melhores ferramentas de análise de dados e também a atualização e o treinamento de todo o pessoal envolvido em manutenção.

O propósito de monitorar a condição de um item é coletar dados da condição de degradação para ser possível detectar falhas prováveis para permitir o planejamento da manutenção no tempo adequado. Um outro propósito de monitorar a condição é aumentar o conhecimento de causas e efeitos que deterioram um componente (BENGTSSON, 2007).

Conforme (RASTEGARI et al., 2013) manutenção baseada em condição é baseada em gestão e decisões através de informações coletadas por meio de monitoramento de condições. A Figura 3 ilustra algumas características dos diferentes tipos de manutenção.

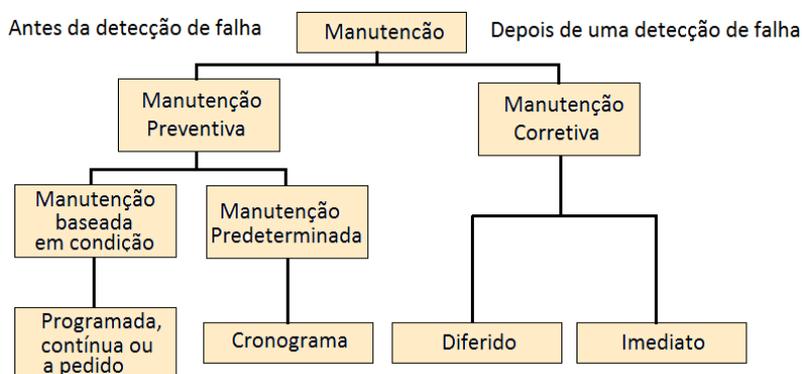


Figura 3: Diferentes tipos de manutenção - (modificado) (RASTEGARI et al., 2013)

Entre as dificuldades que podem ser destacadas para implantação dessa monitoração é que ela exige custos de implantação relativamente altos devido essa necessidade de utilizar uma instrumentação melhorada e do tratamento de todos os dados.

De um lado, os custos podem ser maiores ainda quando os equipamentos já estão implantados e não foram projetados com esse conceito, de outra forma quando essa condição já inicia no projeto ou até mesmo se utiliza de tecnologias sem fio os custos podem ser atenuados. É importante para todos os usuários, tanto fabricantes quanto consumidores, decidirem quais setores ou equipamentos são importantes o investimento, utilizando CBM, considerando uma grande quantidade de equipamentos existentes nas empresas e plantas industriais. Devido a esses custos elevados, inicialmente as indústrias de petróleo e gás foram as que tiveram uma melhor aceitação dessa condição. A introdução de CBM provoca uma grande mudança organizacional, que em alguns casos (empresas estatais, por exemplo) alteram a forma com a manutenção é realizada e toda a organização da manutenção de uma empresa.

Mesmo com a utilização de equipamentos que registram e informam valores de vibração (deslocamento ou aceleração), temperatura, pressão ou outras referências que informam a condição de saúde de um equipamento, em alguns casos a interpretação do agente da manutenção torna-se muito importante, ou seja, mesmo equipamentos iguais ainda exigem uma análise qualificada de um profissional de manutenção.

Isto implica que mesmo com a utilização de sistemas mais caros e mais confiáveis CBM é apenas uma ferramenta que integra todo o conjunto da manutenção. Em plantas industriais a produção e utilização em escala maior desses sistemas permitira um custo mais baixo de produção com uma menor utilização de recursos.

Devido as cobranças sobre utilização de recursos ambientais que as empresas estão cada vez mais sendo cobradas, a minimização de dados, a otimização de recursos fazem com que esses tipos de equipamentos sejam cada vez mais importantes.

Para melhorar e agilizar a capacidade de atuação da manutenção, aumentando a disponibilidade operacional e reduzindo os custos é necessário conhecer todo o ciclo de vida o equipamento, que pode ser resumido basicamente em três fases:

1. (BOL) - Período inicial do ciclo de vida;
2. (MOL) - Período médio do ciclo de vida;
3. (EOL) - Período final do ciclo de vida.

Estes períodos também podem ser observados na Figura 4.

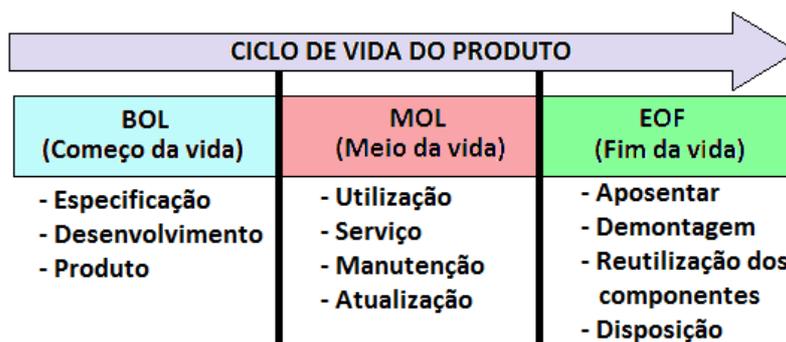


Figura 4: Ciclo de vida do produto  
(modificado) (UTTERBACK; ABERNATHY, 1975)

Existem vários trabalhos descritos sobre desenvolvimento de sistemas em tecnologia CBM, alguns construídos como ferramentas de análises que se utilizam de *AI* (Inteligência Artificial) como redes neurais, *Lógica Fuzzy*, *Expert System* e outras soluções híbridas.

O artigo (NIPPASHI; HENRIQUES; PEREIRA, 2013) descreve a utilização dos Mapas de Kohönen para análise das condições de operação do sistema de engrenagens de um atuador elétrico, identificando as condições de falhas na abertura e fechamento do atuador. Esse artigo demonstra a utilização de RN (Redes Neurais) aplicadas a manutenção baseada na condição. A utilização de uma política de manutenção adequada se torna necessária para o monitoramento do desgaste dos componentes das máquinas a fim de aumentar o tempo de sua utilização sem comprometer a qualidade do produto.

A manutenção baseada em condição se apresenta como a abordagem mais apropriada para esse controle. Dentre as diversas abordagens utilizadas para o desenvolvimento de programas para esse tipo de manutenção, as técnicas baseadas em Inteligência Artificial vêm se destacando no que diz respeito ao seu desempenho. Os resultados são um índice de acerto acima de 90% na classificação e identificação de defeitos e partículas de desgaste. (ALMEIDA, 2011)

A tecnologia CBM apresenta alguns padrões que podem ser verificados de acordo com as seguintes normas:

1. MIMOSA
2. OSA-CBM
3. IEEE 1451
4. IEEE 1232

Estas normas serão brevemente descritas a seguir.

### 2.2.2 MIMOSA

Dentro de tecnologia de sistema de manutenção baseada em condição, *MIMOSA (Machinery Information Management Alliance Open System - [www.mimosa.org](http://www.mimosa.org))* existe desde meados da década de 1990. Esta norma hospeda convenções abertas para o intercâmbio de informações entre sistemas de plantas e máquinas de informação, ou seja, uma forma de melhorar, entre outras coisas, o problema de compatibilidade entre os diferentes produtos de fornecedores. (BENGTSSON, 2004)

MIMOSA<sup>TM</sup> é uma associação da indústria focada em soluções para o setor. Permite estabelecer relações industriais interoperável para *Commercial Off The Shelf (COTS)*.

Empresas que estão criticamente dependente de ativos físicos complexos têm focado historicamente os esforços de integração em duas grandes linhas de ação: Controle em tempo real e sistemas de informação de negócios. Especialistas dentro dessas duas áreas raramente trabalham diretamente uns com os outros e não se concentram na integração entre as camadas. Surgindo assim uma área sem atuação por parte de desenvolvedores. Isto é agravado quando os processos de O&M, sistemas e pessoas não são eficientemente integrados uns com os outros, resultando numa diferença de informação correspondente. Juntas, essas lacunas criam um espaço vazio no centro do processo empresarial e integração de informações.

No passado, ineficiências operacionais provenientes da falta de integração foram ignoradas ou minimizadas devido a uma falta geral de compreensão interdisciplinar. Otimização global exige uma integração adequada dos processos, sistemas e pessoas de O&M. MIMOSA está trabalhando em soluções eficazes para eliminar estes obstáculos à eficiência. (MIMOSA, 2015)

### 2.2.3 OSA-CBM (*Open Architecture Sistem - Condition Based Maintenance*)

OSA-CBM se aplicam em sistemas de manutenção baseada em condição e integram uma ampla variedade de softwares e componentes de hardware, além de estruturas inter-relacionais para esses componentes.

A especificação OSA-CBM é uma arquitetura padrão para mover as informações em um sistema de manutenção baseada em condição. Um olhar em profundidade revela uma forma de reduzir custos, melhorar a interoperabilidade, aumentar a concorrência, incorporar mudanças de design, e ainda mais a cooperação no domínio da manutenção baseada em condição. Ela descreve os seis blocos funcionais de sistemas de CBM, bem como as interfaces entre os blocos. O padrão proporciona um meio para integrar muitos componentes distintos e facilita o processo especificando as entradas e saídas entre os componentes. Em suma, ele descreve um sistema de prestação de informação normalizada para monitoramento baseado em condições.

O OSA-CBM é definida utilizando a *Unified Modeling Language (UML)* e é projetado como uma aplicação multi-tecnológica, o que significa que separa a informação

que pode ser trocada em um sistema de manutenção baseada em condições e as interfaces técnicas dos integradores de sistemas.

Enquanto alguns fornecedores optam por uma implementação em tempo real, outros colaboradores podem desenvolver implementações utilizando os padrões XML e serviços web.

Conforme (BENGTSSON, 2003) o padrão OSA-CBM proposto divide um sistema CBM em sete diferentes camadas/componentes que serão brevemente descritos a seguir:

**Camada 1** Módulo Sensor:

O módulo sensor fornece o sistema CBM com dados do sensor ou transdutor digitalizados.

**Camada 2** Processamento de Sinal:

O módulo de processamento de sinais recebe sinais e dados a partir do módulo sensor ou outros módulos de processamento de sinal. A saída do módulo de processamento de sinal digital inclui filtrar os dados do sensor, os espectros de frequência, os sinais dos sensores virtuais e outras características CBM.

**Camada 3** Monitor de condição:

O monitor de condição recebe dados dos módulos de sensores, os módulos de processamento de sinal e outros monitores de condição. Seu foco principal é comparar os dados com os valores esperados. O monitor de condição também deve ser capaz de gerar alertas baseados em limites operacionais predefinidos.

**Camada 4** Avaliação de Saúde:

O módulo de avaliação de saúde recebe dados de diferentes monitores de condição ou de outros módulos de avaliação da saúde. O foco principal do módulo de avaliação de saúde é o de prescrever, se a saúde no componente, sub-sistema ou sistema monitorado tem se degradado. O módulo de avaliação de saúde deve ser capaz de gerar registros de diagnóstico e propor possibilidades de falha. O diagnóstico deve ser baseado em tendências no histórico de saúde, estado operacional e de carga e histórico de manutenção.

**Camada 5** Prognóstico:

O módulo de prognóstico deve ter a possibilidade de tomar conta de dados de todas as camadas anteriores. O foco principal do módulo prognóstico é calcular a saúde futura de um ativo, tendo em conta, para os perfis de utilização futuras. O módulo deve relatar o estado de saúde futuro de um tempo especificado ou a vida útil remanescente (RUL).

**Camada 6** Apoio à Decisão:

O módulo de apoio à decisão recebe dados do módulo de avaliação de saúde e módulo de prognóstico. Seu foco principal é gerar ações recomendadas e alternativas. As ações podem estar relacionados à manutenção ou como executar o ativo até que a missão atual é concluída sem ocorrência de avaria.

**Camada 7** Apresentação:

O módulo de apresentação deve apresentar dados de todos os módulos anteriores. As camadas mais importantes para apresentar seriam os dados de módulos a avaliação de saúde, prognósticos e de apoio à decisão, bem como alertas gerados a partir

da condição de monitores.

A capacidade de olhar ainda mais para baixo na camada deve ser uma possibilidade. O módulo de apresentação poderia ser construído em uma interface de máquina regular.

Essas camadas também podem ser observadas na Figura 5 (modificada) extraída de (MIMOSA, 2015).

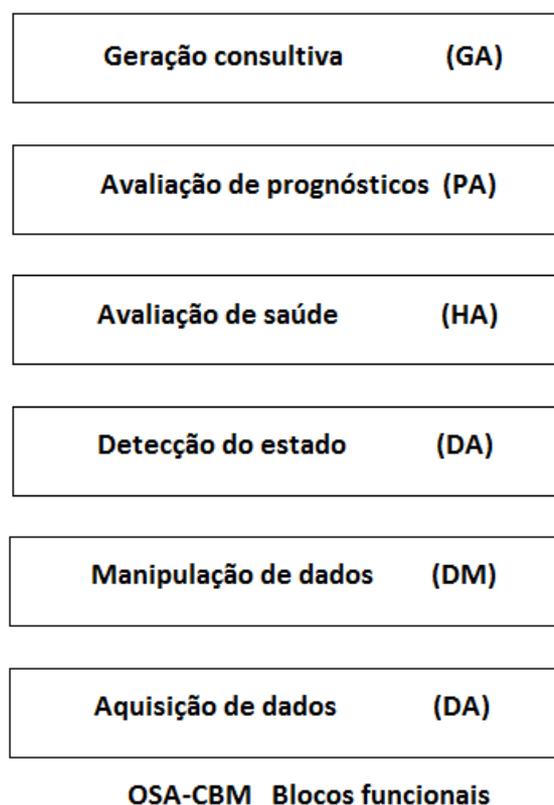


Figura 5: Sistema de Arquitetura Aberta - Manutenção Baseada em Condição (MIMOSA, 2015) (modificado)

#### 2.2.4 IEEE 1451 - Padrão de Interface de Transdutor Inteligente

O padrão IEEE 1451 fornece uma ligação entre as duas especificações padrão: MIMOSA e OSA-CBM. Desenvolver uma interface de sensores padrão e um protocolo de redes é vantajoso para ambos os fabricantes de sensores e usuários finais.

Um padrão de rede não só reduz os custos de fiação do sensor e permite instalação plug and play do sensor e conexão com os instrumentos de medição existentes em campo, mas também abre o caminho para uma futura atualização do sistema e expansão. O padrão IEEE 1451 define um quadro que consiste em dados e modelos de objetos para obter os dados do sensor para a rede.

O padrão IEEE 1451 define o modelo de dados do sensor no transdutor *Smart Transducer Interface Module (STIM)*, que consiste em uma folha de transdutor eletrônico de dados (*Transducer Electronic Data Sheet - TEDS*) e uma interface de transdutor independente *Transducer Independence Interface - TII*. A TEDS de um sensor contém dados relacionados com a fabricação, como nome do fabricante, tipo de sensor, número de série e dados de calibração.

O padrão IEEE 1451 define um modelo de objeto transdutor inteligente que descreve o comportamento dos sensores usando uma linguagem orientada a objetos. Através deste modelo, os dados brutos do sensor são corrigidos com os dados de calibração para produzir uma saída de uma unidade física padronizada. O modelo de objeto IEEE 1451 também define uma interface de rede independente de programação de aplicativo (*Application Programming Interface - API*), que permite a comunicação de informações do sensor para qualquer aplicação transdutor baseado em rede. (LEE; GAO; SCHNEEMAN, 2002)

### **2.2.5 IEEE 1232 - AI-ESTATE, *The Artificial Intelligence Exchange and Service Tie to All Test Environments***

De acordo com (BENGTSSON, 2003) os sistemas técnicos de hoje são mais complexos, caros e difíceis de diagnosticar e reparar. Para resolver esses problemas o subcomitê do IEEE *Diagnostic and Maintenance Control (D&MC)*, desenvolveu a IEEE 1232 família padrão, *AI-ESTATE, Artificial Intelligence Exchange and Service Tie to All Test Environments (AI-ESTATE)* para todos os ambientes de teste.

Os objetivos com o padrão IEEE 1232 são:

- Incorporar a terminologia específica de domínio;
- Facilitar a portabilidade do conhecimento de diagnóstico;
- Permitir a extensibilidade do conhecimento de diagnóstico;
- Permitir a troca consistente e integração de capacidades de diagnóstico.

A família padrão IEEE1232 foi desenvolvida para fornecer formatos de troca padrão e serviços para sistemas de reconhecimento utilizados no teste de sistema e diagnóstico. Os formatos de troca e serviços são baseados em um modelo de informações necessários para apoiar o teste e diagnóstico. Ferramentas como *Computer Aided Design (CAD)*, *Computer Aided Manufacturing (CAM)*, e *Automatic Test Equipment (ATE)* geram grandes quantidades de dados de um produto. Bases de dados do produto são grandes devido à complexidade dos próprios produtos e o detalhes das informações. Bancos de dados de diagnósticos são muitas vezes difíceis de manter, porque o conhecimento corporativo, muitas vezes desaparece como as transições de produtos do projeto à fabricação, desde a fabricação até o mercado e, finalmente, até o reparo.

A descrição do produto em uma fase do ciclo de vida deve ser utilizável por ferramentas em fases subsequentes para evitar reinserção de dados. Cada fase do ciclo do produto tem informação única e faz contribuições de informações exclusivas.

Para melhor tomada de decisão é necessário uma melhor informação em tempo hábil. As normas (*AI-ESTATE*) são normas de intercâmbio de informações do produto para teste e diagnóstico.

Os modelos de informação foram desenvolvidos para os padrões de IEEE1232, tornou-se evidente que esses modelos poderiam ser usados para padronizar testabilidade e diagnosticabilidade métricas. Esta norma define formalmente um conjunto de serviços de software padrão a ser fornecido por um conformador de diagnóstico em um ambiente de teste de arquitetura aberta.

O IEEE 1232 também fornece a base para testabilidade e diagnosticabilidade métricas precisas e inequívocas. (SHEPPARD; KAUFMAN, 2000)

## 2.3 Projeto Experimental e Análise Estatística

A metodologia do planejamento fatorial, associado à análise de superfícies de respostas, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978).

É fato bem conhecido que o desenvolvimento de um novo produto ou processo é, em geral, dependente de um grande número de variáveis. Deve ocorrer um planejamento consciente dos experimentos que devem ser realizados. Devem ser determinadas e mesmo quantificadas as influências das variáveis sobre as respostas desejadas, e é indispensável para que resultados confiáveis sejam obtidos para que análises estatísticas consistentes possam ser realizadas. (COSTA, 2011)

Quando o problema envolve dados que estão sujeitos a erros experimentais, a metodologia estatística é a única abordagem objetiva para sua análise. Assim, existem dois aspectos para qualquer problema experimental: o projeto dos experimentos e a análise estatística dos dados, os quais estão rigorosamente relacionados. Assim, o método de análise depende diretamente do projeto empregado.

A análise estatística experimental é um instrumento para obter um modelo matemático, que representa um processo ou alguns aspectos de um, fornecendo relações quantitativas entre os parâmetros mais importantes do processo e as respostas desejadas. (SILVA, 1996)

Conforme (WERKEMA; AGUIAR, 1996) um experimento é um processo no qual alterações propositais são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possa avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões destas alterações. Seguindo esse raciocínio, um experimento consiste em um método onde uma variável resposta é estudada através da variação de fatores controláveis de um processo. Processo é um conjunto de causas ou fatores - insumos, equipamentos, informações do processo ou medidas, condições ambientais, pessoas e métodos ou procedimentos - que tem como objetivo produzir um determinado efeito (produto do processo), que apresenta uma ou mais respostas observáveis.

### 2.3.1 Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial é uma técnica bastante utilizada quando se tem duas ou mais variáveis independentes (fatores). Ele permite uma combinação de todas as variáveis em todos os níveis, obtendo-se assim uma análise de uma variável, sujeita a todas as combinações das demais.

Planejamentos fatoriais são extremamente úteis para medir os efeitos (ou influências) de uma ou mais variáveis na resposta de um processo. O usual é realizar um planejamento com dois níveis, no máximo três. O uso de mais níveis aumentaria sobremaneira o número de pontos experimentais, fato esse que se quer evitar quando se propõe um planejamento. O planejamento fatorial é a única maneira de prever interação entre os fatores. A representação de um planejamento fatorial em dois níveis é  $2^k$ , onde 2 significa o número de níveis e  $k$  o número de fatores. No caso de três níveis, tem-se  $3^k$ . (CALADO, 2003)

### 2.3.2 Vantagens no uso do Planejamento Fatorial

Conforme (COSTA, 2011) as vantagens do uso da ferramenta de Planejamento Fatorial são as seguintes:

- Reduz o número de experiências ou repetições e melhora a qualidade da informação

obtida através dos resultados. Isto significa uma sensível diminuição do trabalho e, conseqüentemente, do tempo e do custo final.

- Os fatores são analisados simultaneamente. Assim, pode-se verificar e quantificar efeitos sinérgicos e antagônicos entre os fatores de interesse.
- É possível otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo. Esta é uma das grandes vantagens do planejamento fatorial.
- Permite calcular e avaliar o erro experimental. Isto é fundamental para que possamos especificar o nível de confiança estatística com o qual pode-se estimar a reprodutibilidade do resultado desejado.
- Depende mais da competência do profissional em sua área de atuação que de seus conhecimentos em estatística. Em outras palavras, com uma base mínima necessária de estatística, um pesquisador consciente poderá desenvolver seus planejamentos com sucesso.

### 2.3.3 Erros Experimentais

Para a obtenção de dados experimentais confiáveis, é necessário executar um procedimento bem definido, com detalhes operacionais que dependem da finalidade do experimento. Não se pode dar uma resposta justa sem ter uma estimativa da incerteza associada a esses valores, porque cada uma das operações de laboratório envolvidas na titulação está sujeita a erros, e todos eles irão se juntar para influenciar o resultado final - e portanto nossas conclusões. O resultado insatisfatório pode não ser culpa da amostra, e sim das variações inerentes ao procedimento analítico. O mesmo se pode dizer do resultado aparentemente bom. (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010)

### 2.3.4 Tipos de Erros

As medidas adotadas estão associadas a erros, esses podem ser devido aos instrumentos, a calibração dos instrumentos, aos métodos utilizados, aos procedimentos realizados e outros. Existe uma possibilidade de se fazer inferências incorretas a partir de resultados experimentais, e possivelmente chegar a uma resposta falsa para um problema em estudo. Para evitar essas conclusões equivocadas, é necessário saber lidar com erros experimentais e com o próprio planejamento do experimento.

Pode-se descrever os erros como *sistemáticos*, quando os erros afetam o resultado sempre na mesma direção, ora para mais, ora para menos. Erros sistemáticos podem ser eliminados seguindo-se rigorosamente os procedimentos experimentais padronizados.

Outros erros em que não se consegue controlar as variações e que parecem devido ao acaso são chamados de erros *aleatórios*. Para a obtenção de conclusões sensatas, esses erros precisam ser tratados adequadamente.

O erro experimental descreve as variações entre unidades experimentais idênticas e igualmente tratadas. As várias origens do erro experimental incluem: a variação natural entre unidades experimentais a variabilidade na medição da resposta. A origem do erro experimental vem da incapacidade de reproduzir exatamente as condições de tratamento de uma unidade para outra, de interações de tratamentos e unidades experimentais. (AZEVEDO, 2009)

### 2.3.5 Determinação do tamanho da amostra em experimentos

De acordo com (CALADO, 2003), em qualquer problema de planejamento de experimentos, a escolha do tamanho da amostra ou do número de réplicas a usar é importante. Considere-se, em primeiro lugar, a determinação do tamanho da amostra para o caso de iguais tamanhos de amostra em cada tratamento.

## 2.4 Distribuições de Probabilidades

A palavra probabilidade está presente sempre que estivermos perante um fenômeno aleatório, isto é, um fenômeno para o qual não se sabe de antemão o que vai acontecer, na próxima repetição, mas para o qual se admite uma certa regularidade a longo termo, ou seja, para um grande número de repetições do fenômeno. Fenômenos aleatórios são fenômenos cujos resultados individuais são incertos, mas para os quais se admite uma regularidade a longo termo, possibilitando a obtenção de um padrão genérico de comportamento. (CANTO; LOURA; MARTINS, 2003)

Conforme (BERTOLO, 2016) quando é aplicada a Estatística na resolução de problemas administrativos, verifica-se que muitos problemas apresentam as mesmas características o que nos permite estabelecer um modelo teórico para determinação da solução de problemas. Os componentes principais de um modelo estatístico teórico são os seguintes:

1. Os possíveis valores que a variável aleatória  $X$  pode assumir;
2. A função de probabilidade associada à variável aleatória  $X$ ;
3. O valor esperado da variável aleatória  $X$ ;
4. A variância e o desvio-padrão da variável aleatória  $X$ .

Há dois tipos de distribuições teóricas que correspondem a diferentes tipos de dados ou variáveis aleatórias: a distribuição discreta e a distribuição contínua, conforme pode ser observado na Figura 6.

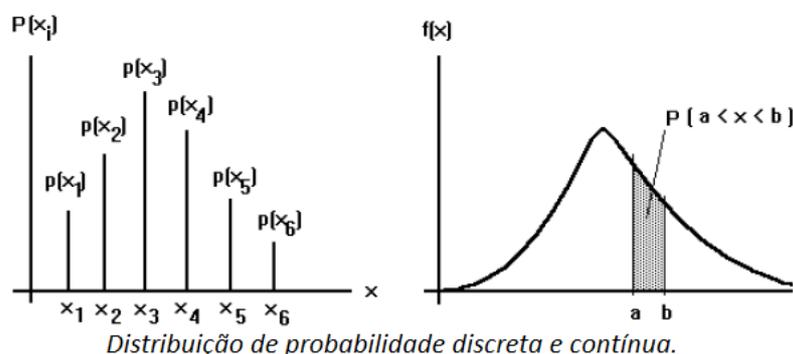


Figura 6: Tipos de distribuições  
(RIBEIRO; CATEN, 2000)

Conforme (RIBEIRO; CATEN, 2000) os tipos de distribuição de probabilidade são:

1. **Distribuições Contínuas:** Quando a variável que está sendo medida é expressa em uma escala contínua, como no caso de uma característica dimensional. No caso de variáveis contínuas, as probabilidades são especificadas em termos

de intervalos, pois a probabilidade associada a um número específico é zero. A distribuição de probabilidade contínua pode ser verificada conforme a Equação 1

$$\{a \leq x \leq b = \int_a^b f(x)\} \quad (1)$$

2. **Distribuições Discretas:** Quando a variável que está sendo medida só pode assumir certos valores, como, por exemplo os valores inteiros 0, 1, 2, etc. A distribuição de probabilidade discreta pode ser verificada na Equação 2.

$$P\{X = x_0\} = P(x_0) \quad (2)$$

O estudo das probabilidades, funções de probabilidades e distribuições permitem realizar um melhor ajuste para identificação, análise e interpretação dos dados. Existem diversos tipos de distribuições de probabilidades, dependendo das áreas do conhecimento e dos sinais que serão amostrados. As distribuições que melhor representam os dados de vida<sup>1</sup> também são conhecidas como distribuições de vida.

As principais distribuições de vida utilizadas pela engenharia de confiabilidade podem ser observadas conforme Tabela 1.

Tabela 1: Distribuições relacionadas à Confiabilidade

DISTRIBUIÇÕES DISCRETAS
Distribuição Bernoulli
Distribuição Geométrica
Distribuição Binomial
Distribuição Binomial Negativa
Distribuição de Poisson
DISTRIBUIÇÕES CONTINUAS
Distribuição Exponencial
Distribuição Gama Generalizada
Distribuição Erlang
Distribuição Normal (Gauss)
Distribuição Normal Truncada
Distribuição Weibull-Gnedenko
Distribuição Lognormal
Distribuição Uniforme

#### 2.4.1 Distribuições discretas mais importantes.

Em muitas situações no estudo de probabilidades algumas distribuições poderão ser utilizadas em paralelo para a análise de um conjunto de dados. Por isso vamos apresentar apenas algumas como referência.

<sup>1</sup>Dados que determinam o tempo de vida médio e da taxa de falhas em função do tempo da população analisada.

### 2.4.2 Distribuição Binomial

Ainda conforme (RIBEIRO; CATEN, 2000) a distribuição binomial é adequada para descrever situações em que os resultados de uma variável aleatória podem ser agrupados em apenas duas classes ou categorias. As categorias devem ser mutuamente excludentes, de forma que não haja dúvidas na classificação do resultado da variável nas categorias e coletivamente exaustivas, de forma que não seja possível nenhum outro resultado diferente das categorias. Seja um processo composto de uma sequência de  $n$  observações independentes com probabilidade de sucesso constante igual a  $p$ , a distribuição do número de sucessos seguirá o modelo Binomial:

$$P(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad x = 0, 1, 2, \dots, n$$

onde  $\binom{n}{x}$  representa o número de combinações de  $n$  objetos tomados  $x$  de cada vez, calculado como:

$$\binom{n}{x} = \left( \frac{n!}{x!(n-x)!} \right)$$

Os parâmetros da distribuição Binomial são  $n$  e  $p$ . A média e a variância são calculados como:

$$\mu = np$$

$$\sigma^2 = np(1-p)$$

A distribuição Binomial é usada com frequência no controle de qualidade. É o modelo apropriado quando a amostragem é feita sobre uma população infinita ou muito grande. Nas aplicações de controle da qualidade,  $x$  em geral representa o número de defeitos observados em uma amostra de  $n$  itens.

A Figura 7 demonstra as características de uma Distribuição Binomial.

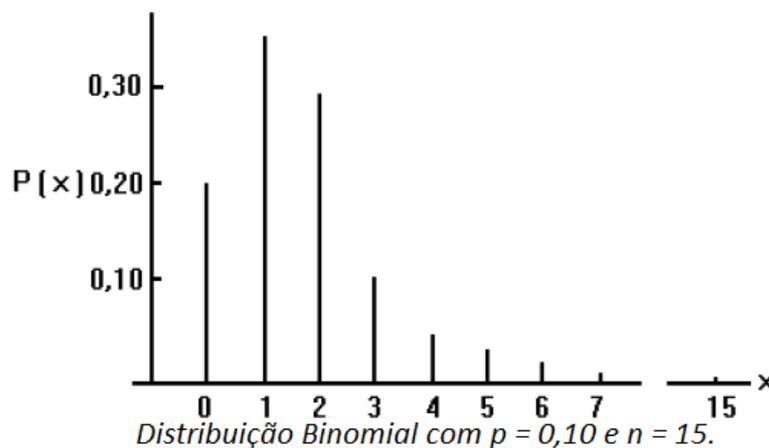


Figura 7: Distribuição Binomial  
(RIBEIRO; CATEN, 2000)

### 2.4.3 Distribuição de Poisson

Conforme (LEITÃO, 2010) a distribuição de Poisson é uma distribuição de probabilidade discreta. Ela expressa, por exemplo, a probabilidade de um certo número de eventos ocorrerem num dado período tempo, caso estes ocorram com uma taxa média conhecida e caso cada evento seja independente do tempo decorrido desde o último evento.

De acordo com (ALVARADO, 2008) esta distribuição proporciona um bom modelo para dados que representam o número de ocorrências de um evento específico numa determinada unidade de tempo ou espaço. Este modelo tem sido empregado para descrever a função de probabilidades de eventos como:

- ✓ a demanda de produtos
- ✓ a demanda de serviços
- ✓ o número de ligações numa central telefônica
- ✓ o número de chegadas de ônibus num terminal de passageiros
- ✓ o número de chegadas de aviões num aeroporto
- ✓ o número de acidentes, por trabalhador, numa fábrica
- ✓ o número de pessoas, por residência, que sofrem de enfermidades contagiosas.

Estes exemplos têm duas coisas em comum: as ocorrências podem ser descritas em termos de variáveis discretas (tomam valores integrais de 0, 1, 2, 3, etc.).

Na distribuição de Poisson a variável discreta  $x$  pode tomar valores de  $x = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ .

Então, a probabilidade de obter-se exatamente  $x$  ocorrências é:

$$f(x) = \frac{\mu^x e^{-\mu}}{x!} \quad (3)$$

onde:

- $\mu$  = É um número real que representa a média aritmética de ocorrências por intervalo de tempo,
- $e$  = É igual a 2,71828 e representa a base dos logaritmos naturais,
- $x$  = Compreende valores 0,1,2,...da variável discreta  $x$  e representa o número de ocorrências.

Na Equação 3 de (ESTATCAMP, 2014) o único parâmetro desconhecido é representado por  $\mu$ . Conhecendo o valor de  $X$  é possível calcular a probabilidade de toda a distribuição de frequências.

O parâmetro  $\mu$  é interpretado como a média aritmética de ocorrências por intervalo de tempo ou espaço, este caracteriza o processo que gera a distribuição de Poisson.

A Distribuição de Poisson exige ainda que:

- ✓ A variável aleatória  $x$  seja o número de ocorrências de um evento em um intervalo,
- ✓ As ocorrências sejam aleatórias,

- ✓ As ocorrências sejam independentes umas das outras,
- ✓ As ocorrências tenham a mesma probabilidade sobre o intervalo considerado.

A Figura 8 ilustra essa distribuição.

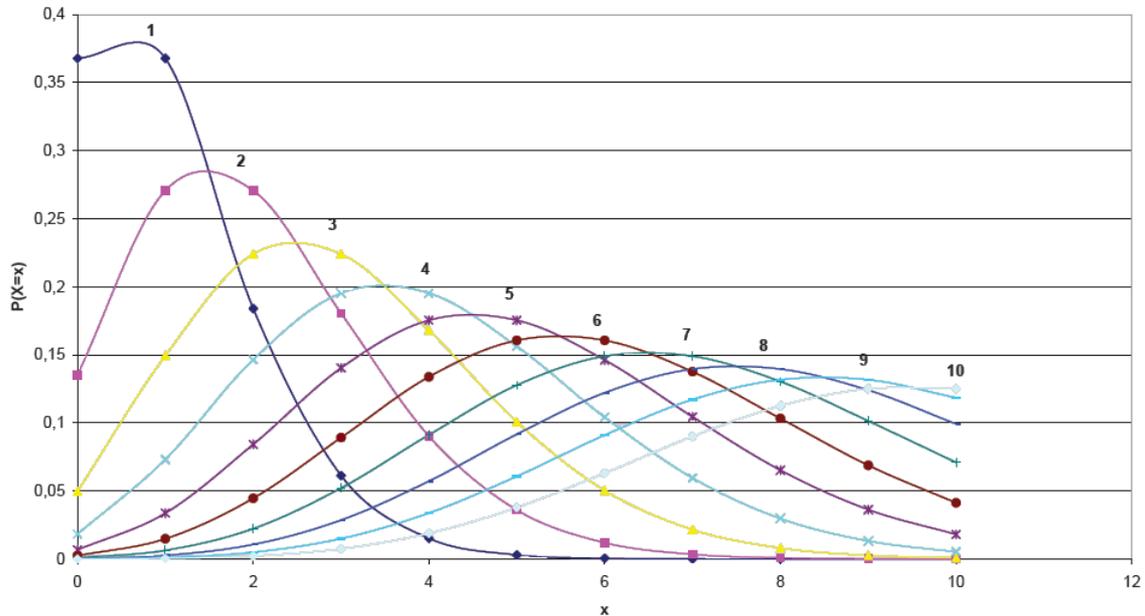


Figura 8: Distribuição de Poisson  
(LEITÃO, 2010)

#### 2.4.4 Distribuições contínuas mais importantes.

A seguir, nesta seção, serão descritas algumas distribuições contínuas que tem importância no campo do estudo de tempos e acelerações de vida.

#### 2.4.5 Distribuição Gama Generalizada

Segundo (RAMOS, 2014) a distribuição Gama Generalizada tem se mostrado um ótimo modelo que leva a excelentes inferências para dados de sobrevivência. Introduzida por (STACY, 1962), uma v.a. (variável aleatória)  $T$  terá distribuição Gama Generalizada (GG) se sua função densidade é dada por:

$$f(t | \theta) = \frac{\alpha}{\Gamma(\phi)} \mu^{\alpha\phi} t^{\alpha\phi-1} \exp(-(\mu t)^\alpha)$$

sendo  $t > 0$ ,  $\theta = (\phi, \mu, \alpha)$ . Os parâmetros de forma são  $\alpha > 0$  e  $\phi > 0$  e  $\mu > 0$  o parâmetro de escala.

A função acumulada é dada por:

$$F(t | \theta) = \int_0^{(\mu t)^\alpha} \frac{1}{\Gamma(\phi)} \omega^{\phi-1} e^{-\omega} d\omega = \frac{\gamma[\phi, (\mu t)^\alpha]}{\Gamma(\phi)}$$

sendo  $\gamma[y, x] = \int_0^x \omega^{y-1} e^{-\omega} d\omega$  denominada de gama incompleta inferior.

Distribuições relevantes podem ser obtidas a partir da distribuição GG, como a distribuição Weibull (quando  $\phi = 1$ ), a distribuição Gama ( $\alpha = 1$ ), Log-Normal (caso limite quando  $\phi \rightarrow \infty$ ) e a distribuição Normal Generalizada ( $\alpha = 2$ ).

A distribuição Normal generalizada é também uma distribuição que inclui várias distribuições conhecidas como, half-normal ( $\phi = \frac{1}{2}, \mu = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}}$ ), Rayleigh ( $\phi = 1, \mu = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}}$ ), Maxwell-Boltzmann ( $\phi = 3/2$ ) e  $\chi(\phi = \frac{k}{2}, k = 1, 2, \dots)$ . (RAMOS, 2014)

A Figura 9 exemplifica essa função.

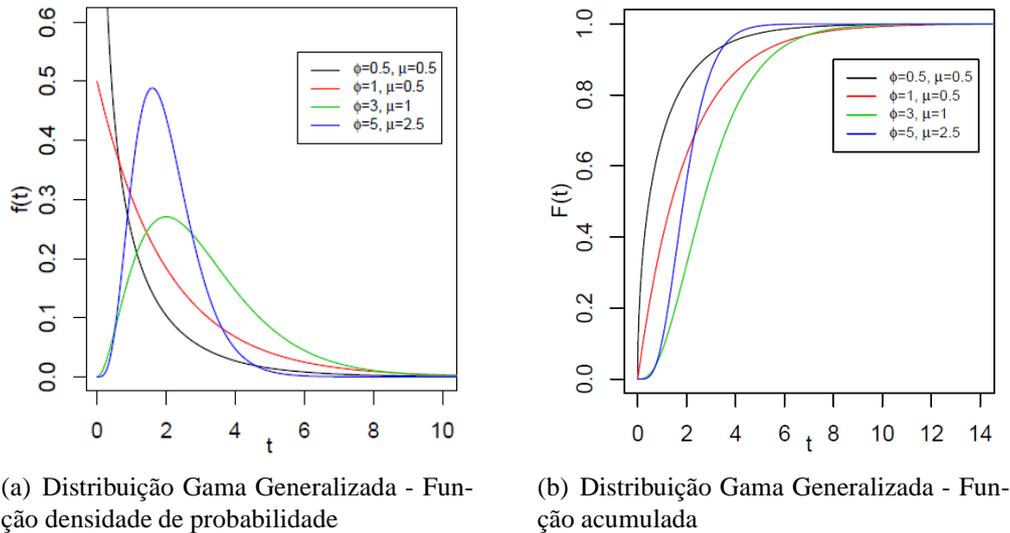


Figura 9: Distribuição Gama Generalizada, diferentes valores de  $\phi$ ,  $\mu$  e  $\alpha$ .

#### 2.4.6 Distribuição Normal (Gauss)

Conforme (ESTATCAMP, 2014) a distribuição normal conhecida também como distribuição gaussiana é sem dúvida a mais importante distribuição contínua. Sua importância se deve a vários fatores, entre eles o teorema central do limite, o qual é um resultado fundamental em aplicações práticas e teóricas, pois ele garante que mesmo que os dados não sejam distribuídos segundo uma distribuição normal a média dos dados converge para uma distribuição normal conforme o número de dados aumenta. Além disso diversos estudos práticos tem como resultado uma distribuição normal.

Uma variável aleatória contínua  $X$  tem distribuição Normal se sua função densidade de probabilidade for dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad x \in (-\infty, \infty)$$

Usamos a notação  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$

A função densidade de probabilidade da distribuição normal com média  $\mu = 0$  e variância  $\sigma^2 = 1$  (de forma equivalente, desvio padrão  $\sigma$ ) é chamada de distribuição normal padrão e assim definida:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

A distribuição Normal é especificada por dois parâmetros:

$\mu$  - representa a média populacional, e

$s$  - representa o desvio-padrão populacional.

A Figura 10 representa a configuração da Distribuição Normal.

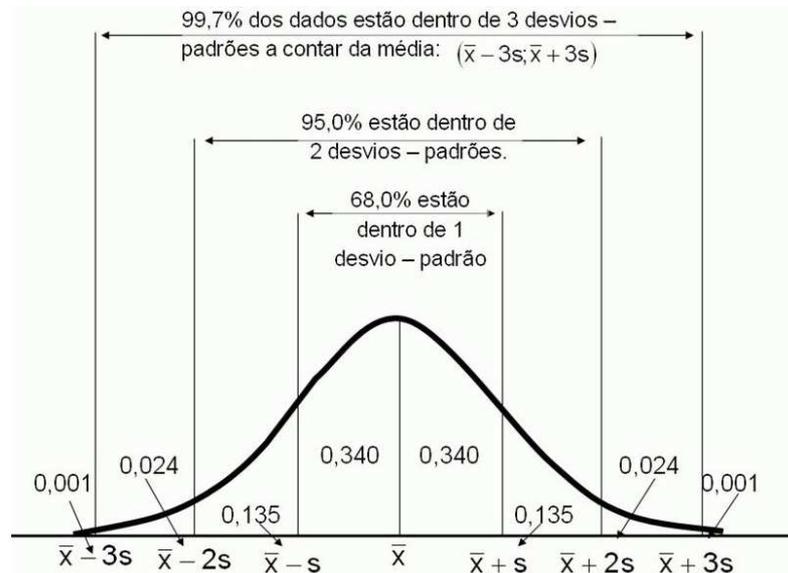


Figura 10: Distribuição Normal  
(PORTNOI, 2005)

De acordo com (CALLEGARI-JACQUES, 2009) a curva normal apresenta as seguintes características:

1. A curva normal tem forma de um sino, com caudas assintóticas ao eixo  $x$ . Isto significa que, teoricamente, os valores de  $x$  podem variar desde  $-\infty$  até  $+\infty$ ; a curva jamais toca o eixo  $x$  e, portanto, determina uma figura aberta nas caudas. Na prática, no entanto, utiliza-se a curva normal com limites finitos.
2. A curva é simétrica em relação à perpendicular que passa pela média ( $\mu$ ).
3. A média, a mediana e a moda são coincidentes.
4. A curva tem dois pontos de inflexão, que correspondem a valores de  $x$  situados, respectivamente, a distância de um desvio padrão  $\sigma$  acima e abaixo da média.
5. A área sob a curva totaliza 1 ou 100%.
6. Aproximadamente 68% ( $\approx 2/3$ ) dos valores de  $x$  situam-se entre os pontos  $(\mu - \sigma)$  e  $(\mu + \sigma)$ .
7. Aproximadamente 95% dos valores de  $x$  estão entre  $(\mu - 2\sigma)$  e  $(\mu + 2\sigma)$ .
8. Aproximadamente 99,7% dos valores de  $x$  estão entre  $(\mu - 3\sigma)$  e  $(\mu + 3\sigma)$ .

### 2.4.7 Distribuição Weibull

Nos últimos anos, têm-se buscado novas distribuições para modelagem do tempo de duração de componentes ou tempo de vida de indivíduos. Esse fato é justificado, em função das distribuições existentes, muitas vezes por não se ajustarem de forma satisfatória ao conjunto de dados reais em estudo. Nesse contexto, generalizações das distribuições existentes têm sido propostas. (RODRIGUES; CHAVES; CASTELLARES, 2012)

Conforme (ALVES, 2016) para questões de projeto, é geralmente mais importante determinar a probabilidade de que uma propriedade de um componente exceda um valor limite do que determinar um valor particular tal como a tensão média de ruptura. A experiência demonstrou que uma distribuição normal (Gaussiana) dos valores de uma determinada propriedade de um material dúctil fornece uma caracterização razoavelmente rigorosa do comportamento do material; o mesmo não se poderá dizer para o caso de um sólido frágil. Como tal, serão necessárias outras teorias estatísticas que considerem a variabilidade da tensão e da resistência à fractura dos sólidos frágeis. A discussão baseada na análise de Weibull, caracteriza a probabilidade de sobrevivência de um dado componente em função do seu volume e da tensão aplicada.

A função Weibull, como demonstra a Equação 4, é considerada como multiparamétrica e pode ser descrita em quatro parâmetros conforme (BINOTI et al., 2011).

$$f(x) = \omega \left( \frac{\gamma}{\beta} \right) \cdot \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^{\gamma - 1} \cdot e^{-\left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^{\gamma}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \text{para } \alpha \leq x < \infty; \\ 0 \text{ para outros valores de } x \end{cases}$$

Onde:

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{é o parâmetro de locação,} \\ \beta &= \text{o parâmetro de forma } (\beta > 0), \\ \theta &= \text{é o parâmetro de escala } (\theta > 0), \\ \omega &= \text{o parâmetro assintótico,} \end{aligned}$$

e  $x$  o centro de classe de diâmetro ( $x > 0$ ).

Segundo (RELIASOFT, 2005) a Distribuição Weibull é usada extensivamente em engenharia da confiabilidade, análise de sobrevivência e em outras áreas devido a sua versatilidade e simplicidade. Uma distribuição é definida matematicamente por sua equação de função densidade de probabilidade (f.d.p.). Existe outras formas de parametrizar a distribuição Weibull, mas a expressão mais geral da f.d.p. é da distribuição Weibull de três-parâmetros, dada pela expressão:

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} e^{-\left( \frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta}}$$

Onde:

$$f(T) \geq 0, T \geq 0 \quad \text{ou} \quad \gamma, \beta > 0, \quad \eta > 0, \quad -\infty < \gamma < +\infty$$

e:

$\beta \rightarrow$  é o parâmetro de forma, conhecido também como inclinação da distribuição Weibull.

$\eta \rightarrow$  é o parâmetro de escala.

$\gamma \rightarrow$  é o parâmetro de posição.

(5)

Frequentemente, o parâmetro de posição não é utilizado, e o seu valor pode ser considerado como zero. Quando tem-se esse caso, a f.d.p. se reduz para distribuição Weibull de dois parâmetros.

Há também o caso onde podê-se reduzir a distribuição Weibull de um parâmetro. Esta de fato, toma a mesma forma da f.d.p. Weibull de dois parâmetros, a única diferença é que o valor de  $\beta$  é suposto de antemão. Esta suposição significa que somente o parâmetro de escala precisa ser estimado, possibilitando uma análise com poucos dados. Recomenda-se que ao fazer isso tenha-se uma estimativa muito boa e justificável para  $\beta$ , antes de usar a distribuição Weibull de um parâmetro na análise. (RELIASOFT, 2005)

As funções mais utilizadas com dois e três parâmetros recebem a denominação de Weibull-2P e Weibull-3P sucessivamente.

De acordo com (MILANEZI, 2012) a distribuição geral Weibull apresenta as seguintes características:

1. Permite uma aplicação a maioria dos casos práticos, com boa precisão, motivo de seu largo emprego.
2. A distribuição Exponencial resulta como um caso particular, e as do tipo Normal, Log-normal, Rayleigh, ou do Valor Extremo, como uma razoável aproximação, suficiente em grande número de aplicações práticas.
3. Permite caracterizar as falhas durante a juventude, vida útil e velhice dos componentes.
4. Na sua forma simplificada (bi-paramétrica) resulta aplicável a muitos casos práticos, por sua maior simplicidade e facilidade de entendimento.
5. Na sua forma tri-paramétrica permite a análise dos casos onde o início da operação do produto não coincide com o início da análise, por exemplo, quando um componente apresenta uma dada quantidade de horas trabalhadas antes do início do registro de falhas.

A distribuição de Weibull é representada conforme a Equação 6 descrita em (LINO et al., 2008) onde é possível identificar dois graus de liberdade:  $\alpha$ , o fator de forma e  $\beta$ , o fator de escalas.

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (6)$$

A Equação 7 representa a função distribuição cumulativa de probabilidade e é derivada da equação 6 de Weibull.

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (7)$$

As Equações 6 e 7 podem ser inter-relacionadas conforme a Equação 8.

$$f(x) = \frac{d}{d(x)} F(x) \quad (8)$$

A relação entre a  $F(x)$  com  $\alpha$  e  $\beta$  pode ser identificada de acordo com o equacionamento descrito a seguir, que resultará na Equação 9.

$$\begin{aligned} 1 - F(x) &= e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \\ 1 - F(x) &= \frac{1}{e^{\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}} \\ \frac{1}{1 - F(x)} &= e^{\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \\ \ln\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right) &= \ln\left(e^{\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}\right) \\ \ln\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right) &= \left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \end{aligned}$$

Onde se obtém a Equação 9 que será útil para estimativa dos resultados através da identificação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ .

$$\begin{aligned} \ln\left\{\log\left[\frac{1}{(1 - F(x))}\right]\right\} &= \alpha \ln\left[\left(\frac{x}{\beta}\right)\right] \\ \ln\left\{\log\left[\frac{1}{(1 - F(x))}\right]\right\} &= \alpha [\ln(x) - \ln(\beta)] \\ \ln\left\{\log\left[\frac{1}{(1 - F(x))}\right]\right\} &= \alpha \ln(x) - \alpha \ln(\beta) \end{aligned} \quad (9)$$

Conforme (SUCENA, 2008) o significado dos parâmetros  $x_0$ ,  $\beta$  e  $\eta$  da Distribuição de Weibull são:

Tabela 2: Parâmetros Weibull  
(SUCENA, 2008) (adaptada)

$x_0$	Vida mínima ou confiabilidade intrínseca.	Tempo de operação o qual o equipamento passa a apresentar falhas, ou seja, intervalo de tempo que o equipamento não apresenta falhas.
$\eta$	Vida Característica ou Parâmetro de Escala.	Intervalo de tempo entre $x_0$ e $x$ no qual ocorrem 63,2% das falhas, restando portanto, 36,8% de itens sem falhar.
Fator de Forma		Indica a forma da curva e a característica das falhas.
$\beta$	Quando $\beta < 1$	Mortalidade infantil (peças falham cedo demais).
	Quando $\beta = 1$	Falhas aleatórias (função exponencial negativa).
	Quando $\beta > 1$	Falhas por desgaste.

Ainda sobre  $\beta$ :

Tabela 3: Parâmetro  $\beta$  - Fator de Forma

$\beta > 1$	Isto pode ocorrer quando uma amostragem contém uma proporção de itens imperfeitos, acarretando falhas antes de um tempo finito livre de falhas. Os parâmetros da Distribuição Weibull dos modos de falhas por desgaste podem ser deduzidos se forem eliminados os itens imperfeitos e analisado os seus dados separadamente.
$\beta = 1$	Pode ser uma indicação que os modos de falhas múltiplos estão presentes ou que os dados coletados dos tempos para falhar são suspeitos. Este é frequentemente o caso dos sistemas os quais diferentes componentes têm diferentes idades, e o tempo individual de operação dos componentes não estão disponíveis. Uma taxa de falhas constante pode também indicar que as falhas são provocadas por agentes externos, tais como: uso inadequado do equipamento ou técnicas inadequadas de manutenção.

As Figuras 11(a), 11(b) e 11(c), adaptadas de (RELIASOFT, 2005) mostram as variações nos parâmetros Weibull e o resultado nos gráficos.

Na Figura 11(a) mostra o efeito dos diferentes valores do parâmetro de forma,  $\beta$ , na forma de pdf (mantendo constante o  $\gamma$ ). Pode-se ver que a forma da f.d.p. pode tomar uma variedade de formas dependendo do valor de  $\beta$ .

No gráfico da Figura 11(b) mostra como a inclinação do gráfico de probabilidade Weibull muda com o  $\beta$ . Os modelos representados pelas três linhas têm todos o mesmo valor de  $\eta$ .

Observa-se que na Figura 11(c) mostra o efeito do valor de  $\beta$  na taxa de falhas da distribuição Weibull. Onde:

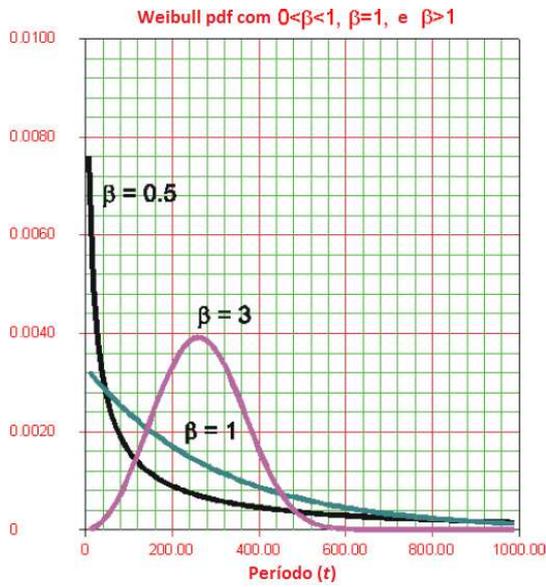
$\beta < 1$  têm uma taxa de falhas que diminui com tempo. Falha infantil ou prematura,

$\beta = 1$  têm uma taxa de falhas razoavelmente constante. Vida útil ou de falhas aleatórias,

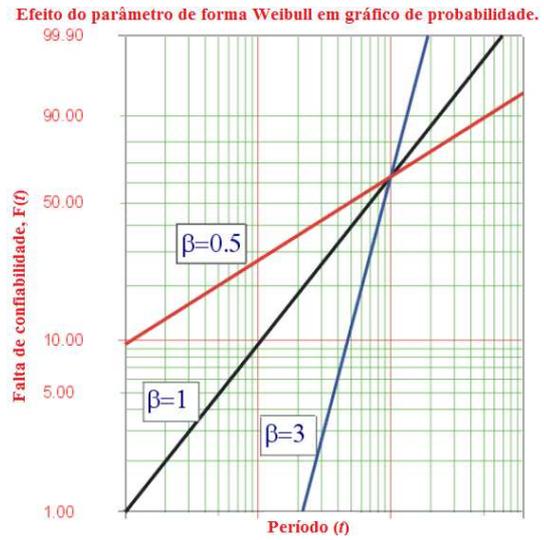
$\beta > 1$  têm uma taxa de falhas que aumenta com o tempo. Falhas de desgaste.

E ainda sobre o  $\beta$ :

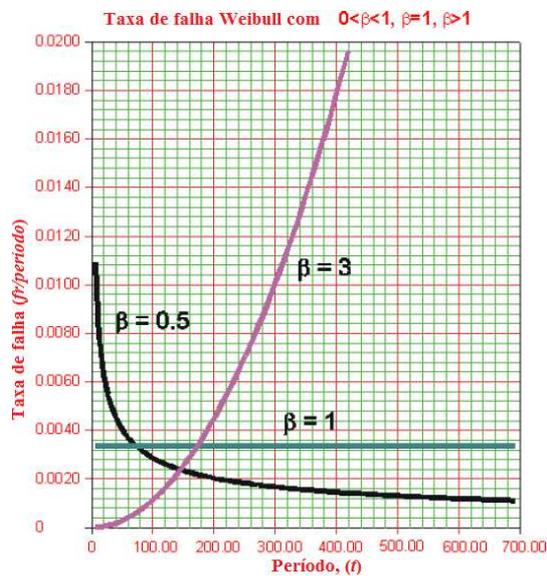
De acordo com os valores obtidos esses betas englobam as três fases da clássica curva da banheira que é realizado quando está em análise uma distribuição Weibull mista onde uma subpopulação apresenta  $\beta < 1$ , uma subpopulação com o  $\beta = 1$  e uma outra com o  $\beta > 1$ , o gráfico de taxa de falhas apresentará um formato semelhante a curva da banheira. Conforme apresentado em (PENA, 2003) e que pode ser visto na Figura 12.



(a) Weibull pdf com diferentes  $\beta$



(b) Diferentes inclinações Weibull para mesmo  $\eta$  e diferentes  $\beta$



(c) Diferentes inclinações Weibull para mesmo  $\eta$  e diferentes  $\beta$

Figura 11: Distribuição Weibull (adaptado)

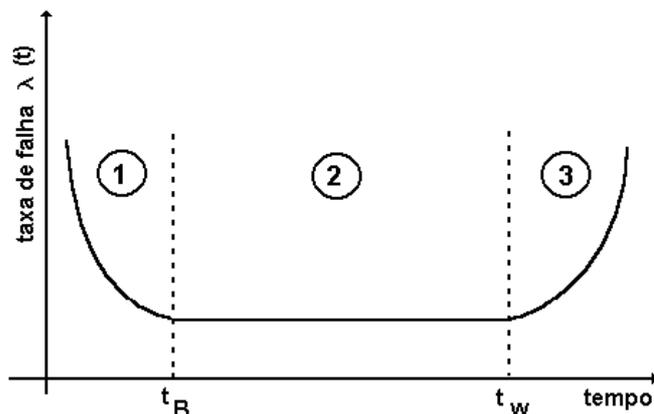


Figura 12: Curva da banheira.  
(PENA, 2003)

## 2.5 Testes de Vida Acelerados - (ALT)

Conforme (NELSON, 1974) teste de vida acelerada de produtos e materiais é usado para obter informações rapidamente sobre suas distribuições de vida. Tal teste consiste em submeter as unidades de teste a condições que são mais grave do que o normal. Isto resulta na vida mais curta do que seria observado em condições normais. Condições de ensaio acelerado são tipicamente produzidas por unidades de testes em altos níveis estáveis de temperatura, tensão, pressão, vibração, repetibilidade, carga, etc, ou qualquer combinação dos mesmos.

A forma clássica de realizar projeções é por meio da utilização de modelos preditivos, como por exemplo os modelos estocásticos, para isso quanto maior o banco de dados melhores serão os resultados obtidos.

Ainda segundo (NELSON, 1974) os resultados obtidos com as condições mais severas ou aceleradas são extrapolados para as condições normais para se obter uma estimativa da vida de distribuição em condições normais. Este tipo de teste fornece uma economia de tempo e custo em comparação com os testes em condições normais.

De fato, para muitos produtos e materiais, a vida útil em condições normais é tão grande que o teste em tais condições é completamente fora de questão.

A análise de dados de ensaios acelerados em um produto é composta da montagem de um modelo com parâmetros desconhecidos a serem estimados a partir dos dados. O modelo ajustado é então utilizado para obter informações sobre o produto, especialmente uma estimativa da distribuição de vida em condições de projeto.

Existem três métodos básicos que são apropriados para a análise de dados de teste de vida acelerada:

1. Métodos gráficos;
2. Métodos de máxima verossimilhança e
3. Métodos de estimativa linear.

Nos testes de vida acelerado conforme (NELSON, 2015) esforço é utilizado num sentido geral para significar qualquer variável de aceleração. A finalidade usual de tais

testes de sobretensão é para estimar a vida ou a degradação do produto a níveis de tensão mais baixos encontrados no uso normal.

Isto é feito através do ajuste estatístico de um modelo de aceleração para os dados de teste e extrapolando o modelo ajustado para estimar a vida ou a degradação do produto a um nível de tensão normal.

Testado sob níveis de utilização de estresse normais, tais produtos duram tanto tempo ou degradam tão pouco que a sua vida ou desempenho não pode ser estimado.

### 2.5.1 Tipos de aceleração e estresse de carregamento

Os testes de vida acelerados podem ser diferenciados de acordo com a maneira como eles são realizados, de acordo com as variáveis analisadas, de acordo com a carga realizada e ainda se são testes simples, múltiplos ou combinados.

Os testes de aceleração pode ser descrito como: alta taxa de utilização, sobre fadiga, censura, degradação e design de amostra.

Vejamos algumas características destes testes retiradas de (NELSON, 2004).

1. Alta taxa de utilização / *High Usage Rate*. Uma forma de aumentar os testes é aumentar a taxa de utilização que pode ser realizada de duas formas:
  - executar o produto mais rápido do que sua forma ao qual ele fora desenvolvido para ser trabalhado, se um produto é utilizado em um ciclo de 1000 RPM sua utilização deve alcançar velocidades superiores;
  - outra forma é reduzir o tempo de utilização, aparelhos que são utilizados apenas algumas horas por dia podem ser utilizados intermitentemente, como por exemplo, 24 h por dia.
2. Sobrefadiga / *Overstress*. Consiste da execução de um produto em níveis mais elevados do que o normal de algum estresse de aceleração para encurtar vida do produto ou para degradar o desempenho do produto mais rápido. Tensões de aceleração típicas são temperatura, tensão, carga mecânica, variação térmica, umidade e vibração.
3. Censura / *Censoring testing*. Consiste em acelerar os testes ate um intervalo de tempo  $t_0$  antes que ocorra a falha do experimento em curso. Isto evita a perda do produto testado mas em algumas condições o intervalo de tempo  $t_1$  poderia ser necessário para uma definição de confiabilidade.
4. Degradação / *Degradation testing*. Consiste em observar as amostras em várias idades, como por exemplo: rupturas de um material, fadigas, desgastes. Um modelo para degradação do desempenho deve ser utilizado para extrapolar o desempenho e tempo de falha. A falha é caracterizada quando o desempenho é observado abaixo de um valor especificado. Isto acelera o teste e a falha atribuída antes da efetiva ocorrência da falha.
5. Design de amostra / *Specimen design*. É uma aceleração de vida que pode ocorrer através das alterações do tamanho, geometria ou acabamento dos produtos.

Um exemplo de como ficam estes testes podem ser observados nos gráficos da Figura 13.

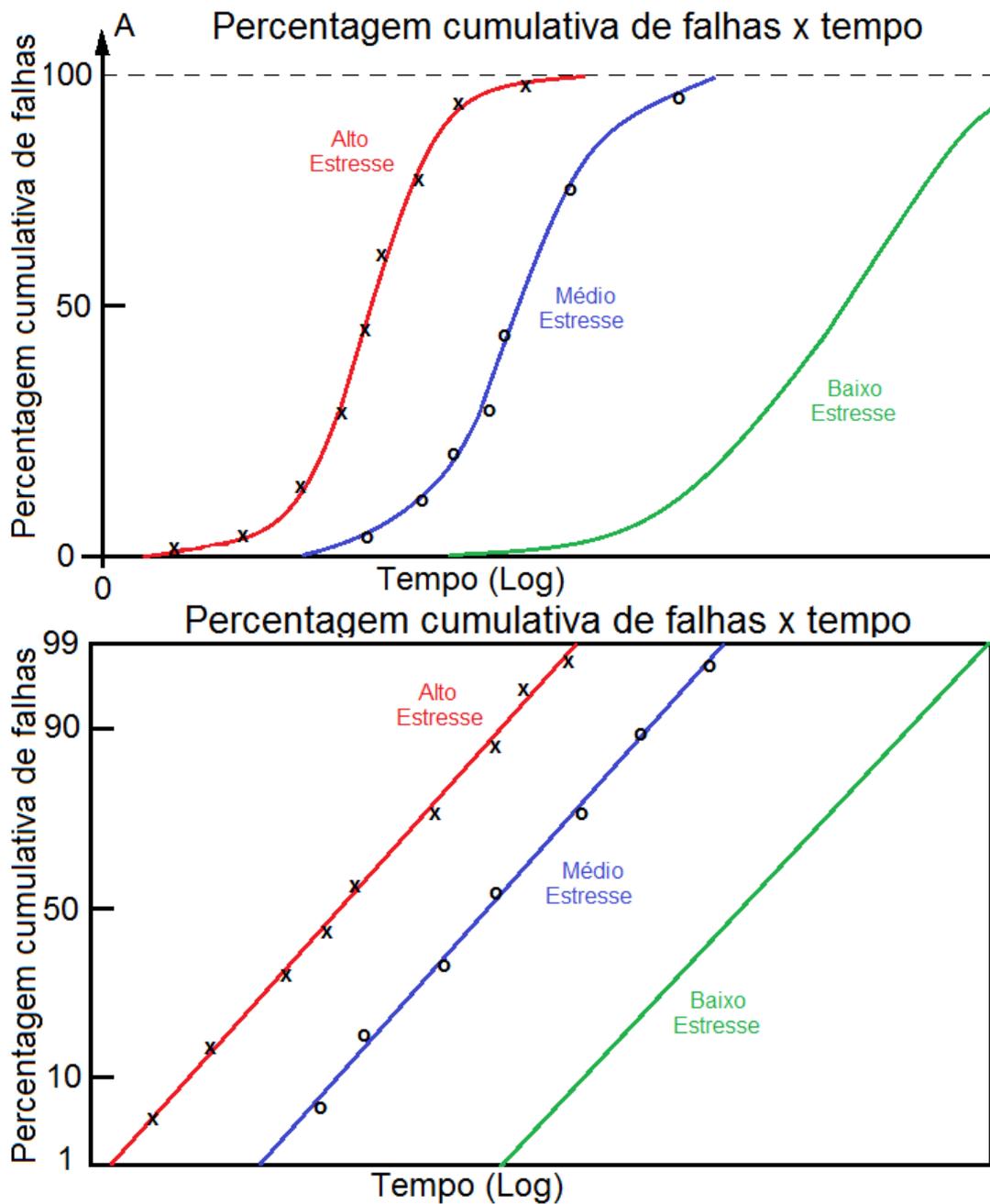


Figura 13: Percentagem Cumulativa de Falhas X Tempo  
Modificado de (NELSON, 2004)

### 2.5.2 Tipo de carga do esforço aplicado

A forma como as cargas são empregadas nos testes não estão limitadas a quantidade de variáveis de estresses e podem apresentar as seguintes caracterizações:

**Estresse constante** (*Constant Stress*) O mais comum carregamento de estresse é o de estresse constante. Cada espécime ocorre em um nível constante e elevado de esforço, conforme pode ser observado na Figura 14.

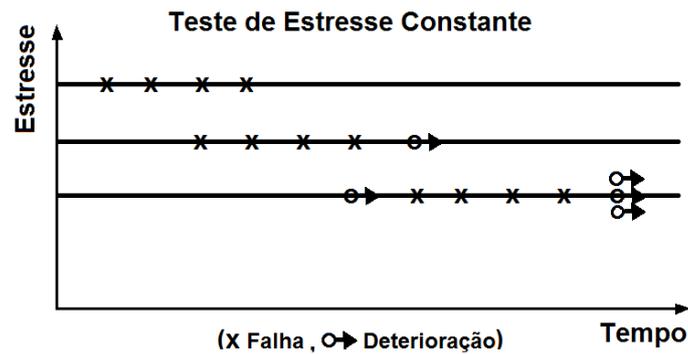


Figura 14: Estresse constante  
Adaptado de (NELSON, 2004).

**Cíclica** (*Cyclic Stress*) Algumas amostras passam por estresse que variam a amplitude e o alcance repetidamente e de forma cíclica, como pode ser observado na Figura 15.



Figura 15: Estresse ciclico  
Adaptado de (NELSON, 2004).

**Passo** (*Step Stress*) A amostra é submetida a níveis sucessivamente mais elevados de estresse durante um determinado tempo. Não ocorrendo a falha ocorre a passagem para um nível de estresse mais elevado previamente planejado. Isso produz falhas mais rapidamente e pode ser observado na Figura 16.

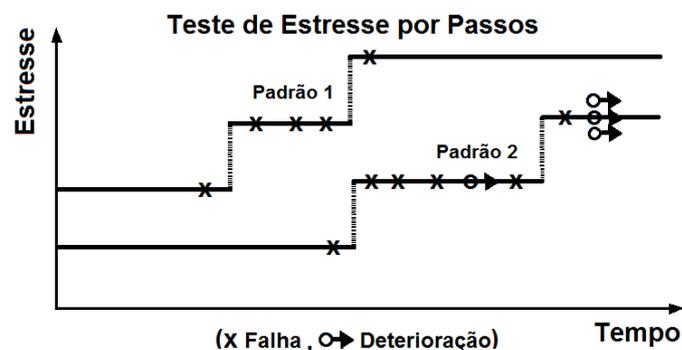


Figura 16: Estresse por passos  
Adaptado de (NELSON, 2004).

**Progressivo** (*Progressive Stress*) A amostra sofre um nível continuamente constante de estresse. Diferentes taxas de aumento de estresse modificam o tempo de ocorrência da falha. Conforme pode ser observado na Figura 17.

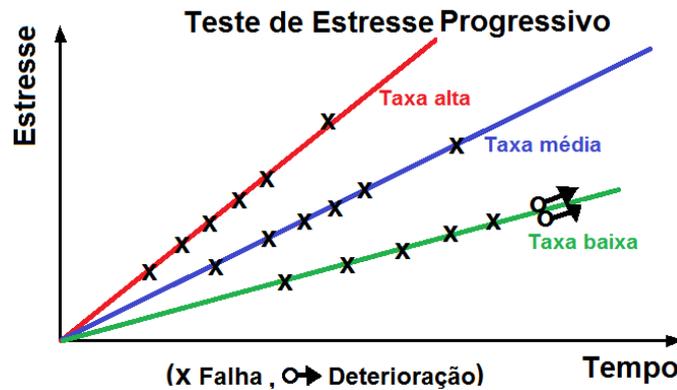


Figura 17: Estresse progressivo  
Adaptado de (NELSON, 2004).

**Randômico** (*Random Stress*) Dependendo da amostra solicitada o estresse pode sofrer níveis aleatórios de cargas. Isto ocorre devido a possibilidade de identificar falhas com mudanças bruscas de carga. Conforme Figura 18.

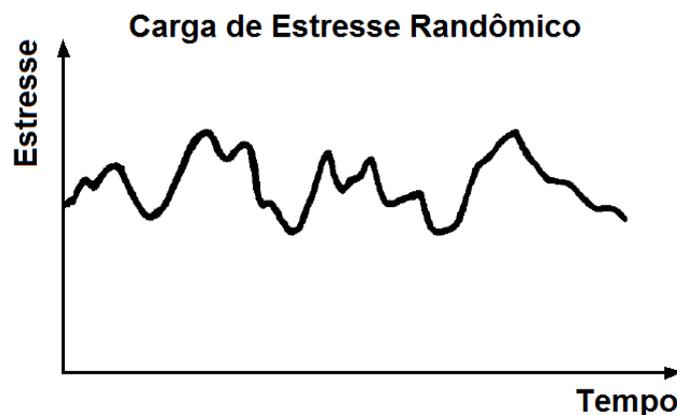


Figura 18: Estresse randômico  
Adaptado de (NELSON, 2004).

### 2.5.3 Tipos de estresse e níveis de estresse

Em um teste quantitativo eficaz de vida acelerada, o analista de dados escolhe um ou mais tipos de estresse que levam o produto para falhar sob condições normais de utilização.

Alguns tipos de estresse podem incluir temperatura, tensão, umidade, vibração ou qualquer outro estresse que afeta diretamente a vida do produto. Isto se aplica a tensão ou tensões em níveis aumentados, cuidadosamente selecionados e, em seguida, registra-se a falha para os produtos em condições de teste acelerado.

Usando-se os dados de vida obtidos em cada nível de estresse acelerado, esse analista pode usar técnicas de análise de dados de vida padrão para estimar os parâmetros para a distribuição de vida que melhor se ajusta aos dados em cada nível de estresse (por exemplo, probabilidades Weibull, Exponencial, Lognormal, etc). Isso resulta em uma f.d.p. (função densidade de probabilidade) de estresse excessivo para cada nível de estresse acelerado. Outro modelo matemático, a relação de tensão-vida, é então necessário para estimar o PDF no nível normal de utilização de estresse com base nas características das PDF's em cada nível de tensão acelerada. (RELIASOFT, 2015)

## 2.6 Sinais processados na medição de dados e detecção de falhas

A vibração ocorre quando uma massa oscila mecanicamente ao redor de um ponto de equilíbrio. Em muitos casos, as vibrações são indesejáveis, porque gastam energia e provocam estresse e ruído - normalmente os sistemas são projetados de forma a minimizar esses tipos de vibrações. Som e vibração são basicamente oscilações em meios diferentes; da mesma forma que vibrações podem criar som, ondas acústicas que se propagam pelo ar também podem gerar oscilações em materiais sólidos. Podemos representar o som e a vibração como oscilações; as oscilações mais simples são formas de onda sinodais, expressas no tempo como  $\omega = 2\pi f$ , que têm a frequência angular  $\omega$  e a fase  $f$  como constantes. A frequência angular  $\omega$  é representada em radianos por segundo (rads), ela é relacionada à frequência (Hz ou s-1). A frequência angular sempre é descrita em relação a uma fase  $f$ , que descreve o deslocamento da onda a partir de um ponto de referência específico no tempo inicial  $t_0$ , normalmente expressa em graus ou radianos. (NATIONAL, 2016)

### 2.6.1 Análise de medições de som e vibração

Em aplicações reais, os sinais de tensão medidos são formas de onda complexas, que contêm muitas componentes de frequência. A análise do som e da vibração normalmente envolve a identificação e análise dessas componentes de frequência. Para fazer isso, precisamos converter matematicamente os sinais do domínio do tempo ao domínio da frequência, usando transformadas de Laplace, Z- ou Fourier. A análise de Fourier é a mais comumente usada para essa aplicação, por fornecer a magnitude em decibéis (dB) e a fase  $f$  associada (graus ou radianos) de cada componente de frequência presente em um sinal. (MERCÊS MACHADO, 2006)

#### a) Sensores IEPE

Os indicadores típicos para as medições de som e vibração são respectivamente a aceleração e o nível de pressão sonora. Esses indicadores são comumente medidos com o uso de dispositivos como acelerômetros (choque e vibração) e microfones (som). Muitos sensores usados para medir aceleração e pressão são baseados no princípio da geração piezoelétrica. O efeito piezoelétrico indica a capacidade de materiais cerâmicos ou cristais de quartzo de gerar potencial elétrico ao sofrerem esforços de compressão. Esses esforços mecânicos são disparados por forças tais como aceleração, *strain* ou pressão. Os acelerômetros, por outro lado, contém uma massa sísmica que aplica forças diretamente a cristais colocados ao seu redor em resposta a choques e vibrações. A tensão gerada é proporcional aos estresses internos dos cristais. Uma classe particular de sensores piezoelétricos, conhecida como sensores piezoelétricos eletrônicos integrais (IEPE), incorpora

em seu projeto um amplificador, colocado próximo dos cristais piezoelétricos. Como a carga produzida por um transdutor piezoelétrico é muito pequena, o sinal elétrico produzido pelo sensor é susceptível ao ruído; dessa forma precisamos usar circuitos eletrônicos sensíveis para amplificar e condicionar o sinal e reduzir a impedância de saída do sensor. Dessa forma, é claro que o IEPE integrará seus circuitos eletrônicos sensíveis o mais próximo possível do transdutor, para garantir uma melhor imunidade ao ruído e facilitar o encapsulamento. Um sensor IEPE típico é alimentado por uma fonte de corrente constante externa e modula a sua tensão de saída conforme a variação da carga aplicada ao cristal piezoelétrico. O sensor IEPE usa apenas um ou dois fios, usados simultaneamente para a excitação do sensor (corrente) e a saída do sinal (tensão). (GAMA; BARROSO; NAVARRO TORRES, 2016)

### **2.6.2 Procedimentos para realizar medições de som e vibração**

Os circuitos de condicionamento de sinal usados na medição de som e vibração são relativamente simples. Um sistema de medição de aceleração ou nível de pressão sonora típico contém os seguintes componentes:

1. Sensor
2. Fonte de corrente, para excitar o sensor
3. Aterramento adequado, para eliminar a captação do ruído
4. Acoplamento CA, para remover offsets CC do sistema
5. Um amplificador de instrumentação, para elevar o nível do sinal do sensor
6. Um filtro passa-baixa, para reduzir o ruído e evitar o aliasing no sistema de aquisição de dados
7. Circuito de retenção e amostragem simultâneas, para manter o timing adequado entre os diversos sinais

O sinal adquirido do sensor é formado por componentes CC e CA, sendo que a parte CC desloca a parte CA com relação ao zero. O acoplamento CC remove o deslocamento CC do sistema usando um capacitor em série com o sinal. Um sistema de sensor com acoplamento CA elimina a deriva CC de longo prazo dos sensores provocada pelo envelhecimento e temperatura, o que aumenta drasticamente a resolução e a faixa dinâmica utilizável do sistema. (TREVISAN, 2011) modificado.

### **3 METODOLOGIA PROPOSTA**

Este trabalho foi desenvolvido dentro de um projeto de cooperação Brasil-Alemanha dentro do tema de Manutenção Inteligente, que está sendo desenvolvido no Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica LASCAR, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ele se insere dentro do subprojeto da Integração de Sistemas Inteligentes de manutenção e fornecimento de peças para cadeia produtiva (I2MS2C) cujo objetivo principal é desenvolver uma metodologia básica para fornecer informações sobre as condições operacionais das peças e componentes, com antecedência para fabricantes de máquinas e equipamentos. Neste capítulo será demonstrado o estudo de caso utilizado para realização do presente trabalho bem como os procedimentos adotados para a realização dos testes.

#### **3.1 BRAGECRIM**

O programa Bragecrim (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura) tem o objetivo de apoiar e financiar projetos conjuntos de pesquisa entre grupos de pesquisa brasileiros e alemães na área de tecnologia de manufatura avançada. Também visa gerar conhecimento tecnológico fundamental, possibilitando o desenvolvimento de soluções inovadoras para o aprimoramento da produtividade, qualidade e sustentabilidade das companhias industriais tanto brasileiras quanto alemãs. Outro importante objetivo é a troca de conhecimento por meio de missões de trabalho e de estudos de pesquisadores/docentes e estudantes de ambos os países, (CAPES, 2016).

##### **3.1.1 Integração de Sistemas de Manutenção Inteligente e Fornecimento de Peças na Cadeia de Suprimentos - (I2MS2C)**

O objetivo global é melhorar a eficiência das operações de reposição de gerenciamento de serviços de peças para sistemas de gerenciamento de produção. Isto será alcançado através da integração de informações fornecidas pelos sistemas embarcados de manutenção inteligente (IMS) para melhoria dos métodos de planejamento e coordenação, bem como processos na cadeia de fornecimento de peças de reposição. Em contra partida as operações de manutenção irão se beneficiar do melhor planejamento da operação de serviços, de demandas de serviços sincronizadas com disponibilidade de peças de reposição e as capacidades de manutenção. (MUNSTER et al., 2016)

No contexto da Integração de Sistemas de Manutenção Inteligente e Fornecimento de Peças na Cadeia de Suprimentos - (I2MS2C) o foco principal é na fase MOL (período médio do ciclo de vida) onde os produtos manufaturados são entregues aos usuários finais, produtos são utilizados, mantidos e servidos por clientes, um serviço de pós-venda ou um

prestador de serviços de terceiros. (KIRITSIS, 2009).

O objetivo principal deste trabalho é estudar uma metodologia básica que permita fornecer informações de saúde de um equipamento eletromecânico, com antecedência, para a cadeia de abastecimento. A Figura 19 apresenta as áreas do projeto Bragecrim e suas iterações. A metodologia analisada pretende interligar a área temática 1 e 3, para isso procura a viabilização de uma metodologia possa fornecer ao módulo de simulação, informações suficientes que permitam efetuar o processo de logística de maneira mais otimizada.

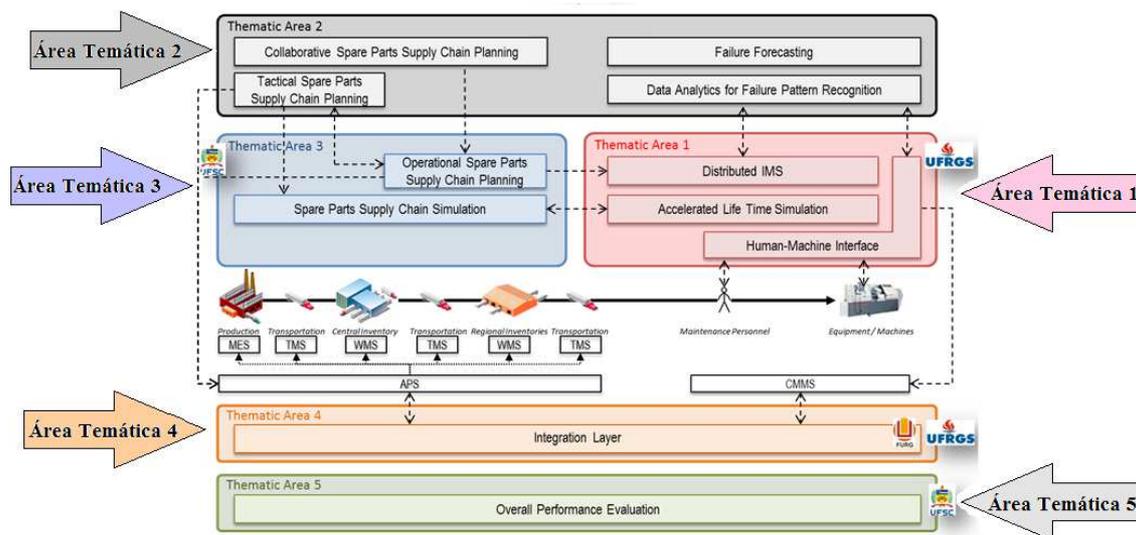


Figura 19: BRAGECRIM - Áreas Temáticas - Área Temática 3 (CAPES, 2016) (Modificado)

### 3.2 Proposta da Metodologia

A utilização de modelos matemáticos estocásticos permite a identificação prévia de falhas em sistemas, em alguns casos exige a interferência de um técnico para identificação da(s) peça(s) que estão envolvidas neste fato. O reconhecimento de assinaturas de falhas permite a identificação de falhas em determinados componentes.

Nos testes realizados os componentes são submetidos a condições mais severas em relação aos seus padrões de utilização. Isto pode ser realizado em componentes individuais ou até mesmo produtos complexos. Eles servem para antecipar o modo de falha e avaliar a condição de confiabilidade. Isso permite a reutilização do equipamento em estudo, para inúmeros testes com uma manutenção mínima e sem a necessidade de grandes recursos financeiros.

Neste trabalho serão analisadas as assinaturas de diferentes tipos de falhas com vistas a classificação da sua variação entre amostras de um mesmo lote de falhas e sua variação em relação as outros tipos de falhas conhecidas.

### 3.3 Descrição dos equipamentos e banco de dados

Dentro do amplo projeto de manutenção, fora instalado um atuador, modelo CSR-16-Inteligente, de fabricação da empresa Coester Automação Ltda, amplamente utilizado em plantas de refinarias de petróleo da Petrobras no Brasil.

### 3.3.1 Hardware utilizado

Para montagem do sistema de movimentação, controle e coleta de dados do atuador foram utilizados os seguintes equipamentos conforme apresentado em (PICCOLI et al., 2015) (modificado):

1. Para o registro de dados fora utilizado um controlador de dados que é utilizado para comunicação de rede, data logging, controle e processamento de dados, da empresa National Instruments<sup>TM</sup> modelo CompactRIO<sup>®</sup>, série cRIO-9004<sup>®</sup> conforme Figura 20. Além das funções de registro e armazenamento esse equipamento também é o responsável pelas ações de abertura e fechamento do atuador, acionamento de freios mecânicos, alterações em válvulas pneumáticas de pressões entre outras ações.



Figura 20: Controlador e Data Logger cRIO-9004<sup>®</sup>/ National Instruments<sup>TM</sup>

2. Atuadores Elétricos para válvulas, têm como características básicas: movimentar válvulas e outros elementos como comportas, *dampers*, etc., através do acionamento feito por motores elétricos, trifásicos ou monofásicos, de corrente alternada ou corrente contínua. (COESTER, 2001) O atuador utilizado é o modelo CSR6 da empresa Coester Automação, conforme ilustrado na Figura 21



Atuador Elétrico - (CSR 06 - CSR 16)

Figura 21: Atuador Coester  
(COESTER, 2007)

3. Uma válvula pneumática proporcional, conforme Figura 22, e um disco de freio, Figura 23, foram utilizados para os testes de bancada e injeção de falhas.



Figura 22: Válvula de Pressão Proporcional PARKER  
(PARKER, 2006)

4. Outros componentes como acelerômetros, mangueiras, cabos, conectores e etc também foram necessários.

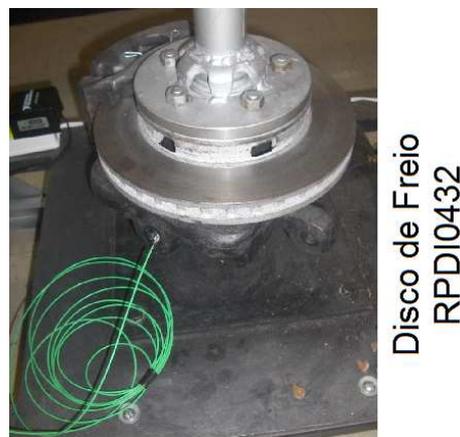


Figura 23: Disco de frenagem  
(BOSA, 2009)

Todos esses componentes fazem parte de uma bancada de testes desenvolvida no âmbito de um projeto FINEP e apresentada na Figura 24. A configuração de teste adotada na preparação de casos de teste foi a emulação de um comportamento para as falhas mais comuns encontradas na aplicação no campo, onde o equipamento se torna suscetível à ação de degradação, tais como envelhecimento, corrosão, rachaduras, danos causados por operadores, etc. Assim, foi possível realizar uma emulação de possíveis esforços que a válvula sofre de acordo com a passagem de fluido no tubo. (PICCOLI et al., 2015)



Figura 24: Bancada de testes  
(PICCOLI et al., 2015)

Para simular condições de campo fora verificado junto a empresa fabricante dos atuadores quais as falhas mais comuns registradas e foram empregadas três engrenagens diferentes, simulando condições de campo para: engrenagem normal<sup>1</sup>, engrenagem desgastada e engrenagem de dente quebrado. Essas engrenagens podem ser observadas na Figura 25.

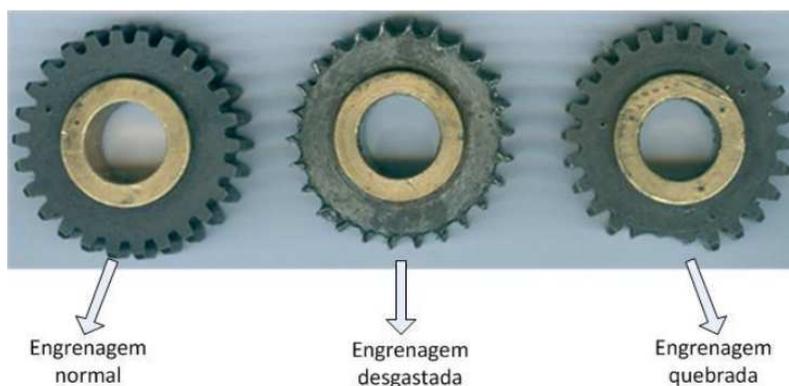


Figura 25: Engrenagens Utilizadas  
(PICCOLI et al., 2015)

A modelagem do atuador através das equações algébricas que descrevem o motor assíncrono, a força exercida pelo fluido, a força de atrito, a força da mola, e a força e torque transmitido para a haste são descritas em (GONÇALVES et al., 2007) e podem ser vistas no anexo A.

Em se tratando das modelagens da válvula e da tubulação estas podem ser observadas em (GONÇALVES, 2011) conforme anexo B.

<sup>1</sup>Definição dada para uma engrenagem genuína de fábrica em boas condições de funcionamento

### 3.3.2 Softwares utilizados

Conforme (PICCOLI et al., 2012) foram utilizados para a aquisição de dados e também para o controle na abertura e fechamento da válvula, pelo atuador, o software LABVIEW<sup>®</sup> da empresa NATIONAL<sup>™</sup>. Através desta ferramenta foi desenvolvida uma Interface Virtual (VI) que permitiu a operação e o armazenamento de dados.

A partir da utilização do ambiente LabView<sup>®</sup>, mostrado na Figura 26, em conjunto com a plataforma cRIO-9004<sup>®</sup><sup>2</sup>, fora disponibilizado no laboratório códigos de vibração, obtidos por meio de de acelerômetros. Os sinais de vibração do motor foram coletados em situações de funcionamento normal (condições disponibilizadas pelo fabricante quando da entrega de um produto novo ao mercado) e funcionamento com o equipamento degradado (defeitos em partes e/ou peças que compõem o conjunto do equipamento).



Figura 26: Software LabView<sup>®</sup> / National Instruments<sup>™</sup>

Inicialmente para a etapa de preparação dos dados, formatação e plotagem dos gráficos foi utilizado o EXCEL<sup>®</sup> da Microsoft<sup>™</sup>, mas posteriormente foram utilizados outros softwares auxiliares como Weibull++/ALTA10<sup>®</sup> da ReliaSoft<sup>™</sup>, Easyfit<sup>®</sup> Professional da MathWave<sup>™</sup> e MatLab<sup>®</sup> da MathWorks<sup>™</sup> Inc.

No módulo Weibull a análise mista é usada para analisar conjuntos de dados que refletem as diferentes tendências no comportamento ao fracasso. Análise de degradação é uma técnica que utiliza as medições de desempenho (degradação) de um produto ao longo do tempo para prever o ponto em que se espera cada unidade na amostra falhe. Essa análise é útil para testes realizados em produtos com fiabilidade muito elevada, em que não é possível testar as unidades à falha sob condições normais.

Já no módulo ALTA<sup>®</sup> o software fornece uma maneira intuitiva e amigável para utilizar modelos matemáticos extremamente complexos e poderosos para análise quantitativa de dados de teste acelerado de vida. Esse módulo é usado para executar análise de dados de testes de vida acelerada quantitativa. Nesta análise é extrapolado o comportamento ao fracasso de um produto em condições normais de dados de vida obtidos a níveis de tensão acelerados. Dado que os produtos falham mais rapidamente a níveis de tensão acelerados, esse tipo de análise permite que sejam obtidas informações sobre a confiabilidade de um produto em um tempo mais curto, como por exemplo, a vida e a probabilidade de fracasso em um momento específico.

<sup>2</sup>Controlador de tempo real

### 3.4 Planejamento dos experimentos

Nesta seção será discutido de forma breve, o planejamento dos experimentos realizados bem como o estudo de caso escolhido e também os testes realizados.

#### 3.4.1 Visão geral do estudo de caso escolhido

Um sistema hidráulico complexo, como é o caso de uma planta industrial, uma refinaria de petróleo, entre outros, possui uma quantidade grande de equipamentos utilizados no transporte dos fluidos até seu destino final, no caso dos combustíveis ou mesmo em produtos intermediários que serão entregues a indústrias petroquímicas de transformação.

Um dos componentes mais importantes nesse circuito hidráulico são as válvulas hidráulicas. Essas são desenvolvidas para realizar o controle dos sistemas hidráulicos industriais. De uma forma simplificada todas as válvulas hidráulicas possuem funções parecidas que são: reduzir, aumentar, fechar ou manter a pressão em determinados pontos da linha. Porém essas válvulas podem ser bastantes diversas, devido as suas características.

Normalmente, as válvulas hidráulicas são nomeadas de acordo com a sua função mais básica. Sendo assim, elas podem ser válvulas de segurança, de descarga, de frenagem, redutora de pressão, de sequência, entre outras. Além disso, para instalar válvulas hidráulicas, um profissional da área precisa dimensionar o nível de pressão exercido naquela instalação. A partir disso, consegue-se determinar a pressão máxima de operação da válvula que precisa ser instalada.

Outro fator que deve ser considerado é que as válvulas hidráulicas precisam estar aptas para aguentar a pressão no ponto instalado e para manter a pressão para qual foi ajustado. Normalmente, elas oferecem a possibilidades de dezenas de posições de ajuste que variam desde inteiramente fechadas até inteiramente abertas. Na maioria das vezes, as válvulas hidráulicas são equipamentos capazes de reduzir a incidência de vazamentos, ruídos, ou as chances de ruptura do sistema.

Quanto a forma construtiva existem diversos tipos de válvulas como por exemplo: gaveta, esfera, globo, etc, sendo que cada uma é indicada para um tipo de aplicação em particular.

Uma atividade bastante comum em que as válvulas hidráulicas são utilizadas é quando há a necessidade de se fazer com que uma operação anteceda outra. Assim, é possível fechar um ponto do sistema enquanto se realiza a manutenção em outras partes. Também é possível isolar partes de processos em uma grande instalação, por exemplo.

As válvulas são controladas por atuadores elétricos que permitem a abertura e fechamento motorizado de válvulas através da movimentação de sua haste. Este conjunto válvula-atuador normalmente estão localizados em ambientes agressivos, sob condições de pressão e temperatura elevadas, e algumas situações são instalados em locais de difícil acesso, portanto recebem informações sobre as condições deste equipamento de forma antecipada permitindo que suas manutenções sejam programadas de forma antecipada evitando danos e riscos de acidentes graves.

Os dados a disposição para este trabalho foram coletados de uma bancada de testes composta por um atuador eletromecânico para válvulas, através de um projeto de pesquisa cooperativa na UFRGS onde também participaram as empresas Transpetro e Coester Automação Ltda.

A Figura 27 exemplifica o conjunto Atuador-Válvula referenciado.

### Conjunto atuador elétrico-válvula



Figura 27: Conjunto atuador elétrico-válvula - Coester Ltda  
(COESTER, 2010)

#### 3.4.2 Descrição do componente selecionado para análise

Nesta etapa serão descritos todos os momentos necessários e utilizados para a execução das análises de dados no atuador. Estas etapas foram utilizadas inicialmente para análises de engrenagens cilíndricas. Engrenagens cilíndricas possuem forma cilíndrica e podem ter dentes retos (internos ou externos) ou ainda helicoidais (inclinados). São projetadas para transmitir movimento normalmente entre eixos paralelos, mas entre engrenagens cilíndricas helicoidais também é possível fazer esta transmissão entre eixos reversos (não paralelos). (SCHREIBER, 2014) A Figura 28 caracteriza essas engrenagens.

Devido as características do estudo aplicado esses procedimentos poderiam ser adotados para outras peças mecânicas que compõem uma máquina/equipamento, também chamados de elementos de máquinas, como por exemplo:

- Elementos de Fixação: rebites, pinos, contra pinos, anéis elásticos, chavetas, parafusos, porcas, arruelas;
- Elementos de Apoio: guias, buchas, rolamentos, mancais;
- Elementos Elásticos (Molas): molas helicoidais, molas planas;
- Elementos de Transmissão: eixos, polias e correias, correntes e rodas para correntes, cabos de aço, fusos, engrenagens, cames, acoplamentos;

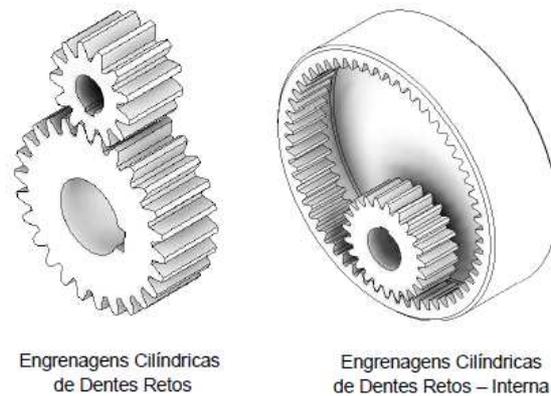


Figura 28: Tipos de engrenagens  
(SCHREIBER, 2014)

### 3.5 Etapas para preparação e análise de dados

Os procedimentos adotados nesta etapa seguem o fluxograma conforme descrito na Figura 29, e serão descritos de forma breve.

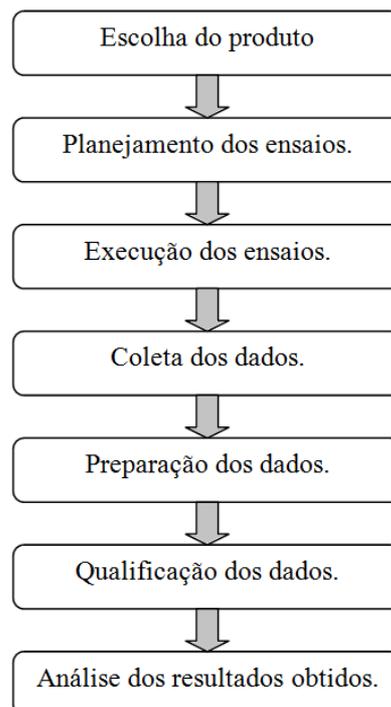


Figura 29: Etapas para preparação e análise de dados

Esta etapa visa descrever, de maneira separada, a identificação dos procedimentos necessários para coletar, preparar, analisar e concluir sobre os dados observados. Esses procedimentos podem ser adotados para outras peças mecânicas de interesse.

#### 3.5.1 Escolha do produto

Em projetos anteriores, como por exemplo em (BOSA, 2009), o atuador fora montado sobre uma bancada de suporte metálico e interligado com um controlador lógico cRIO-9004<sup>®</sup>, para permitir o funcionamento remoto e também coletar as informações

do atuador. O atuador possui uma interface de comando local programável e utiliza um conversor RS232/RS485 para controlar a válvula pneumática.

Esses atuadores, classificados como inteligentes tem a capacidade de detectar algumas falhas internas, como sobreaquecimento do motor, torque excessivo e falta de fase, além disso, possuem a instrumentação necessária para medir os valores de torque exercido na haste por percentual de abertura da válvula.



Figura 30: Bancada de testes atuador-válvula (BOSA, 2009)

### 3.5.2 Planejamento dos ensaios

Além da bancada, conforme visto na Figura 30, estavam disponíveis também engrenagens em boas condições de uso e algumas desgastadas, quebradas para que fossem substituídas no atuador e simulassem um comportamento de falha conhecido.

As peças foram preparadas através da inserção de falhas nas engrenagens que compõem o sistema mecânico do atuador, responsável pela abertura e fechamento deste.

Estas engrenagens compõem o chamado conjunto de engrenagens satélite do atuador, e são partes integrantes do sistema de transmissão de movimento do motor para a haste da válvula. Todas essas são peças genuínas, para não acrescentar mais alguma variável no estudo, e podem ser visualizadas na Figura 31.

Conforme (LAZZARETTI, 2012) foram utilizados apenas os dados do acelerômetro acoplado ao eixo do motor do atuador que de acordo com trabalhos prévios de (FACCIN, 2011) e também (BÖESCH, 2011) são os sensores com melhores resultados na detecção de degradação das engrenagens do atuador. Esta escolha foi feita para não ser necessário abordar a fusão dos sensores na análise.

Acelerômetros e células de carga foram usadas para coletar informações do atuador.

### 3.5.3 Execução dos ensaios

Para a utilização com controles frequentes, devido a necessidade de realizar múltiplos testes e também tentar identificar diferentes falhas, foi utilizada uma interface gráfica, Figura 32, com a bancada a disposição fora possível simular o comportamento do conjunto com peças com diferentes níveis de degradação. Essa informações registradas foram

### ENGRENAGENS E CARACTERÍSTICAS

Item / Peça	Engrenagem	Características
1.		Engrenagem cilíndrica. Peça de reposição. Sem falhas.
2.		Engrenagem cilíndrica. Desgaste nos dentes. Pouca perda de material dos dentes.
3.		Engrenagem cilíndrica. Desgaste nos dentes. Excessiva perda de material dos dentes.
4.		Engrenagem cilíndrica. Dentes quebrados.

Figura 31: Engrenagens e características

utilizadas para a análise dos dados.

De acordo com (FACCIN, 2011) os dados foram amostrados para uma taxa de 1024 amostras por segundo, a fim de tornar o processamento menos custoso computacionalmente. Os dados foram adicionalmente selecionados para o movimento de abertura da válvula, uma vez que este é o momento em que há maior força sendo exercida na sede da válvula e conseqüentemente maior exigência do atuador. Como o sinal de vibração não é estacionário, técnicas de processamento de sinal de tempo e frequência são as mais indicadas para que as características variantes no tempo sejam captadas.

O equipamento funcionou em carga mínima conforme as especificações do fabricante, e todas as peças em bom estado de funcionamento, para que fosse obtido um sinal normal como referência. Este sinal é utilizado como um meio de encaminhamento comportamental quando nada afeta o atuador e mostra todas as partes sem defeitos. A partir desse momento o freio mecânico fora utilizado, através do acionamento pneumático, simulando a utilização de diferentes tipos de cargas.

Em seguida, foram substituídas outras engrenagens, conforme já visto na Figura 31, e o processo foi repetido. Assim sucessivamente até obter todos os sinais de vibração característicos.

#### 3.5.4 Coleta dos dados

Ao longo de todos estes ensaios, os sinais foram armazenados e formou-se a base de dados que permaneceram disponíveis no laboratório. Conforme (FACCIN, 2011) e (BÖESCH, 2011), esses dados permaneceram a disposição totalizando 25 curvas de abertura e 25 curvas de fechamento, coletadas e combinadas gerando um conjunto total

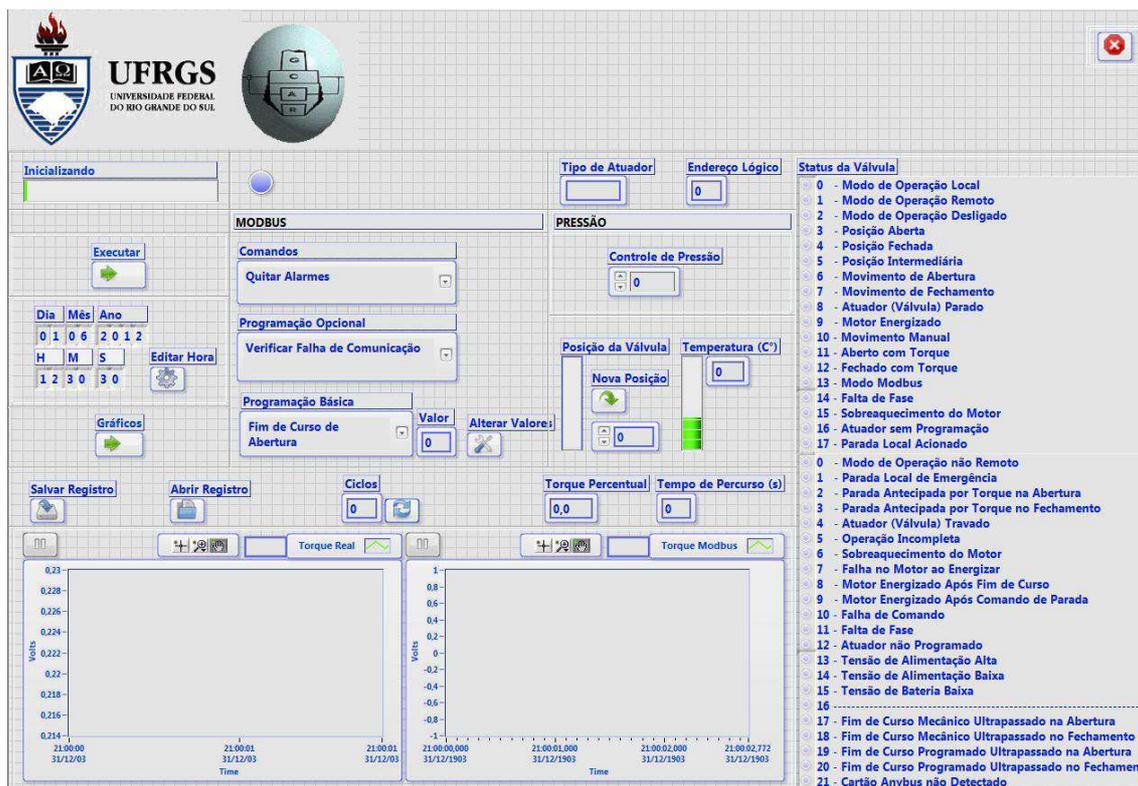


Figura 32: IHM - Interface Homem-Máquina

de 300 curvas. Foi considerado normal o comportamento dos dados obtidos com o atuador funcionando a vazio, isto é, sem atuação do freio, e com todas as engrenagens em perfeitas condições. Um exemplo deste sinal amostrado pode ser visto na Figura 34.

### 3.5.5 Preparação dos dados.

Para cada situação de interesse a ser observada foram coletados diversos sinais correspondentes e para armazenamento destes foram criadas famílias de sinais.

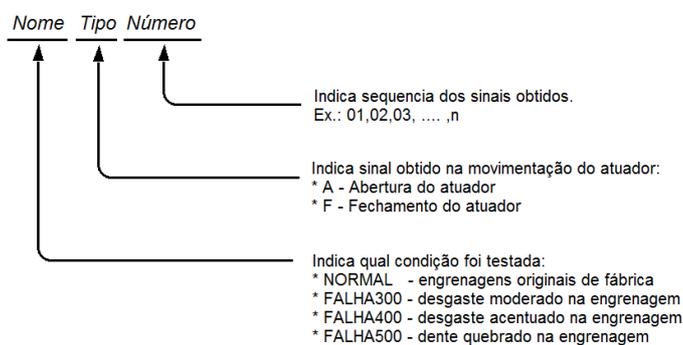


Figura 33: Nomenclatura adotada

Por exemplo, para todos os sinais obtidos a partir do funcionamento normal do equipamento (condição original de fábrica, sem alterações) foi criada a família denominada NORMAL, quando abertura da válvula, pelo atuador, foi acrescentado a letra A e um número indicando qual sequencia de sinal foi coletado.

### 3.5.6 Qualificação dos dados.

Os sinais têm dimensões entre 150 e 160 mil dados de vibração que representam alguns segundos de operação, devido a taxa de amostragem escolhida, assim, para evitar a criação de novas falhas o que não foi verificado durante a operação do atuador ou mesmo uma mudança nas características destas falhas conhecidas.

Um efeito destrutivo maior poderia paralisar a continuação dos testes. O ideal é que o tamanho da amostra é escolhido para produzir estimativas com a precisão desejada, quanto maiores amostras produzidas, maior será a precisão. (NELSON, 2004)

A utilização dos sinais de forma integral dificultou o processamento computacional do mesmo com constantes travamentos do sistema. Para evitar essa situação foram utilizados o fracionamento dos sinais com a utilização de um tamanho menor da amostra.

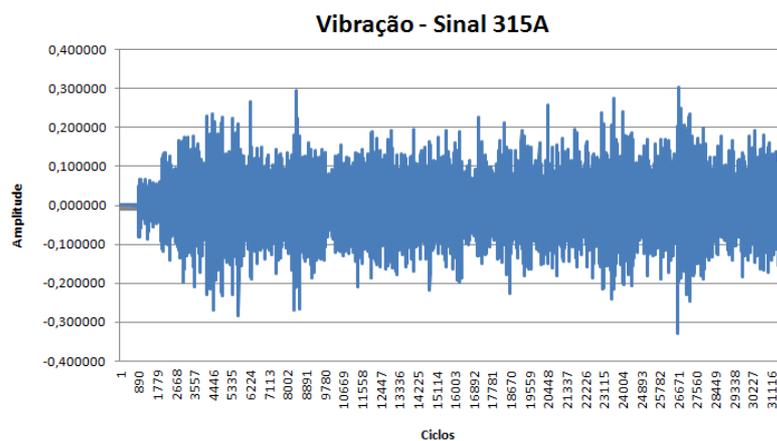


Figura 34: Exemplo de sinal de vibração amostrado

### 3.5.7 Análise dos resultados obtidos

Nesta etapa foram desenvolvidos alguns gráficos utilizando a FFT (Transformada Rápida de Fourier) no ambiente MATLAB. A Transformada Rápida de Fourier pode ser escrita conforme equação 10 de (SEMENTE, 2011):

$$f(x) = \sum_{f=1}^{f+s} \left( \frac{\text{sen}(w.t)}{f} \right) + \sum_{f=1}^{f+s} \left( \frac{\text{cos}(w.t)}{f} \right) \quad (10)$$

Onde:

- $n$  = número de harmônicos;
- $s$  = sequência dos harmônicos;
- $t$  = tempo;
- $w$  = velocidade angular; ( $w = 2\pi \times f$ )
- $f$  = frequência.

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W_N^{ux} \quad (11)$$

Esses gráficos permitem identificar alguns parâmetros, como a quantidade de envolvida, as frequências oscilatórias o que permite realizar algumas inferências posteriormente.

Visando colaborar com a detecção de falhas será feito um estudo da variação da energia, da média e desvio, característico dos sinais de vibração do conjunto da caixa de engrenagens.

### 3.6 Características dos sinais observados.

Basicamente foi dividido em dois grupos: um grupo com as características de um equipamento funcionando em boas condições com as peças não apresentando falhas e o outro grupo funcionando com restrições e as peças apresentando falhas diversificadas.

#### 3.6.1 Sinais funcionando com peças sem falhas

No grupo denominado Normal-A os sinais foram coletados com tamanho médio de 160.000 amostras. Para facilitar o processamento computacional eles foram divididos em sinais menores, com tamanhos de 10.000 ou 20.000 amostras, e foram coletados em intervalos de tempo diferenciados, por exemplo, alguns no início outros no meio ou final do sinal. O propósito disto deve-se a necessidade de observar se haveria diferenças na qualidade do sinal e se isto poderia influenciar os sinais de vibração coletados.

#### 3.6.2 Sinais funcionando com peças defeituosas

Nestes grupos os sinais foram dispostos conforme os defeitos pré-selecionados, ou seja, conforme o tipo de defeito representado pela engrenagem substituída. Estas amostras foram tomadas com este processo, uma vez que se considera que um fenômeno de vibração tende a aumentar a sua potência de transmissão passando deste para outras partes do sistema de engrenagens. O sinal denominado Falha315A apresenta um tamanho de 15.000 dados de amostragem e representa o comportamento do atuador com uma engrenagem apresentando um desgaste leve. Os sinais que representam as engrenagens com desgaste severo foram denominados de Falha400A e são compostos por sinais de 15.000 e 40.000 dados de amostragem. E, finalmente, os sinais do grupo Falha500A representam os sinais com a engrenagem com um dente quebrado e possuem tamanhos de 20.000 e 50.000 unidades de amostragem.

### 3.7 Resumo da Metodologia Proposta

Os passos propostos nesta metodologia estão resumidamente demonstrados na Figura 35 e descritos posteriormente.

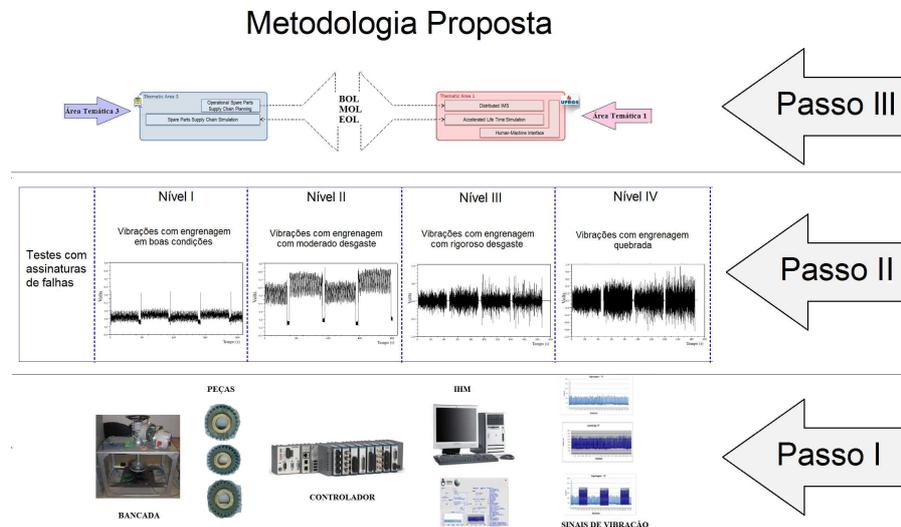


Figura 35: Metodologia Passo a passo

- PASSO I -** Nesta etapa é preparado o equipamento para funcionar inicialmente com todas as peças em boas condições de funcionamento. Os sinais de vibração são coletados através do *Datalogger* e armazenados em um microcomputador. Posteriormente as engrenagens com defeitos, previamente preparadas, são substituídas individualmente e os sinais de vibração são armazenados formando grupos característicos.
- PASSO II -** Nesta etapa é realizada a análise de degradação utilizando energia como base para inferências. Também será analisado a média e o desvio de cada conjunto de amostras a fim de determinar a variação entre os conjuntos de uma mesma condição de operação e entre as diversas condições de operações.
- PASSO III -** Com a identificação dos defeitos e dos respectivos componentes será possível realizar a identificação dos tempos BOL, MOL, EOL na área temática 1 e transferência para a área temática 3.

## 4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta secção, os resultados das simulações serão apresentados. Foram utilizados softwares como o MATLAB<sup>®</sup>/ReliaSoft<sup>™</sup> que permitiram a elaboração de mais de 400 gráficos e 40 tabelas. Os resultados agrupados, comparados e analisados podem ser observados conforme Tabela 4. Uma quantidade considerável de informações foi obtida, os sinais foram verificados isoladamente e comparados entre si. Apenas os resultados mais relevantes serão apresentados aqui.

Uma quantidade considerável de informação foi obtida, Os sinais foram verificados isoladamente e comparados entre si. Apenas os resultados mais relevantes serão apresentados aqui.

Tabela 4: Tabela de Resultados

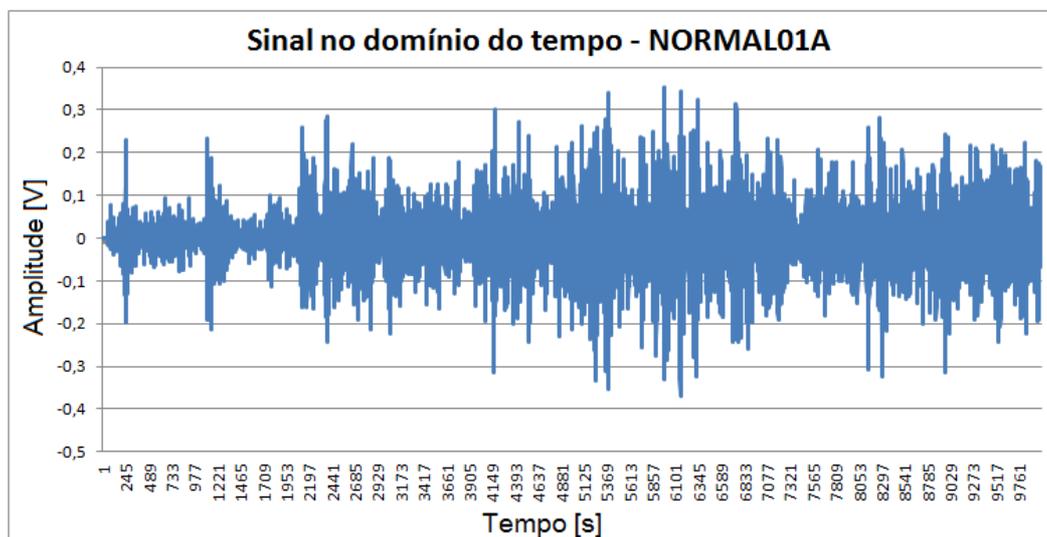
Grupo de Gráficos produzidos para análise (resumo)			
Item	Descrição	Gráficos	Tabelas
1	Espectro de Magnitude Dupla Face	40	4
2	Espectro de Magnitude de dois lados (bins)	40	4
3	Espectro de Magnitude de um lado (bins)	40	4
4	Espectro de Magnitude de um lado (Hertz)	40	4
5	Espectro de Magnitude de um lado (Normalizado para Nyquist)	40	4
6	Espectro de Magnitude de um lado (rads/amostra)	40	4
7	Espectro de Magnitude de dois lados (Hertz)	40	4
8	Espectro de potência de um lado (Hertz)	40	4
9	Espectro de potência de um lado (Frequência mostrada numa escala de log)	40	4
10	Sinais de vibração analisados	40	4
Total:		400	40

Para termos medições exatas, a taxa de amostragem do sistema deve ser de pelo menos duas vezes a frequência dos sinais que estão sendo adquiridos. Para garantir que está sendo amostrado a faixa de frequências correta Isso é feito para garantir a atenuação do ruído das frequências mais altas e que os componentes de *aliasing* que estão acima da taxa de amostragem não distorcerão a medição.

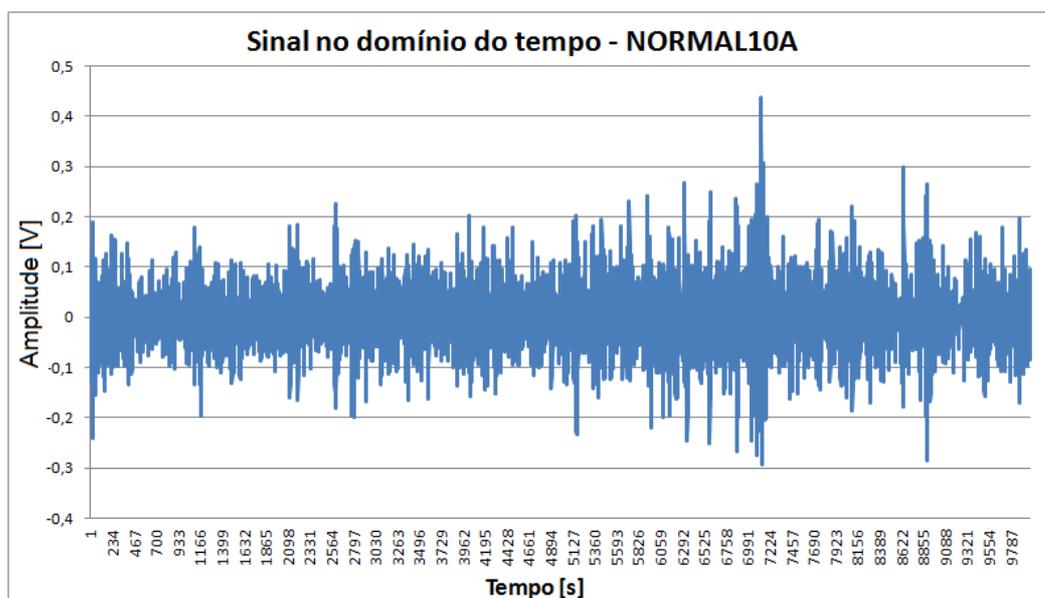
Nos softwares utilizados (descritos anteriormente) é feito uma conversão da tensão adquirida em dados de frequência. Para isso são utilizadas funções de análise espectral (domínio da frequência). Nesse caso foi utilizada a transformada rápida de Fourier (FFT). Como exemplo podemos observar a Figura 37.

#### 4.1 Engrenagem cilíndrica padrão - Grupo de sinais: NORMAL A

De um banco de dados com diversos sinais foram utilizados dez sinais de vibração de cada grupo. Assim o primeiro sinal é denominado NORMAL01A, Figura 36(a), e o último NORMAL10A Figura 36(b)



(a) Sinal de vibração NORMAL01A - abertura do atuador



(b) Sinal de vibração NORMAL10A - abertura do atuador

Figura 36: Exemplos dos sinais de vibrações analisados

Os sinais analisados possuem um tamanho médio de 60.000 amostras. Após a análise integral dos primeiros foi observado que era necessário diminuir o tamanho das amostras para permitir um melhor processamento computacional, visto que devido ao tamanho das amostras o travamento do computador torna-se constante. Após estes ajustes sinais de tamanhos menores foram analisados com tamanhos variáveis de de 10 mil a 30 mil amostras.

Foram produzidos sinais do tipo:

- Espectro de Magnitude Dupla Face;
- Espectro de Magnitude de dois lados (bins);
- Espectro de Magnitude de um lado (bins);
- Espectro de Magnitude de um lado (Hertz);
- Espectro de Magnitude de um lado (Normalizado para Nyquist);
- Espectro de Magnitude de um lado (rads/amostra);
- Espectro de Magnitude de dois lados (Hertz);
- Espectro de potência de um lado (Hertz);
- Espectro de potência de um lado - (Frequência mostrada numa escala de log);
- Sinais de vibração analisados.

A partir dos gráficos pode-se observar que a Análise de Fourier forneceu resultados em que é possível identificar claramente as situações de funcionamento normal do sinal.

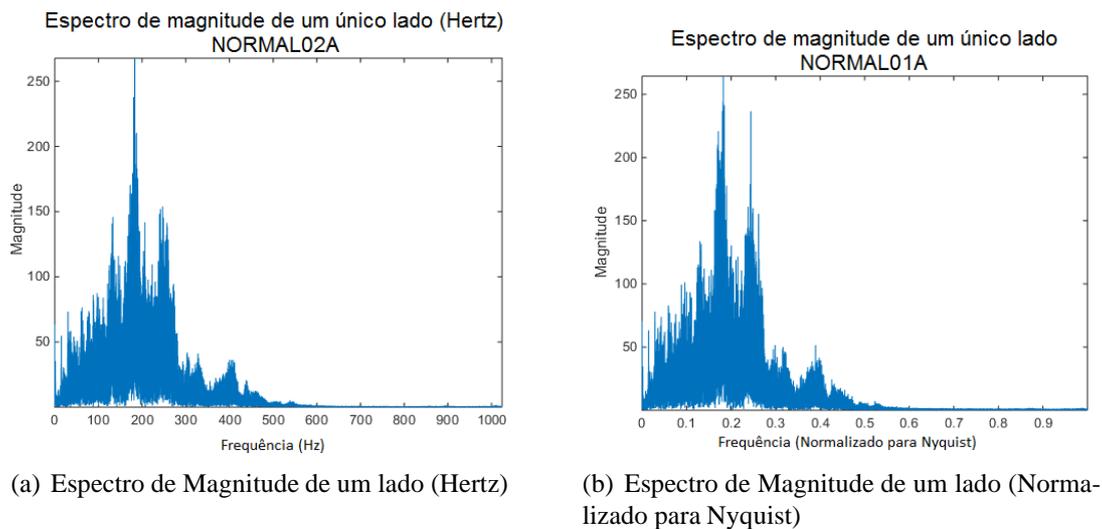


Figura 37: Exemplos de FFT dos sinais de vibrações analisados

A análise de Tempo-Frequência possibilitou a distinção das classes normais e após a associação e comparação dos sinais de amplitude e frequência foi possível caracterizar este sinal como de amplitude média de 0,31 V e frequência média de 189 Hz, conforme Tabela 5

Nos gráficos das Figuras 38(a) e 38(b) é possível observar que a Análise de Fourier fornece a magnitude em decibéis (dB) e a fase  $f$  associada em (graus ou radianos) de cada componente de frequência.

Em aplicações reais os sinais complexos contêm muitas componentes de frequência e com a transformada de Fourier é possível fazer esta conversão e então realizar a observação destes sinais.

Tabela 5: Tabela de Resultados - Grupo NORMAL

Tabela de Resultados - Grupo NORMAL			
Sinais	Descrição	Unidades	
		Amplitude [V]	Frequência [Hz]
NORMAL	NORMAL01A	0,25	190,00
	NORMAL02A	0,25	180,00
	NORMAL03A	0,24	190,00
	NORMAL04A	0,30	190,00
	NORMAL05A	0,34	190,00
	NORMAL06A	0,25	190,00
	NORMAL07A	0,37	190,00
	NORMAL08A	0,35	190,00
	NORMAL09A	0,35	190,00
	NORMAL10A	0,37	190,00
	Média	0,31	189,00

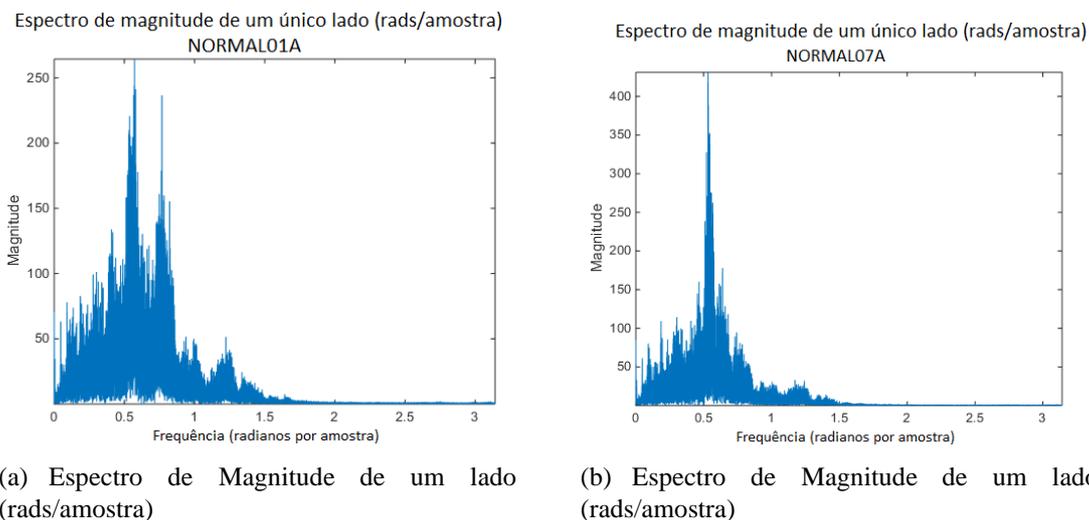


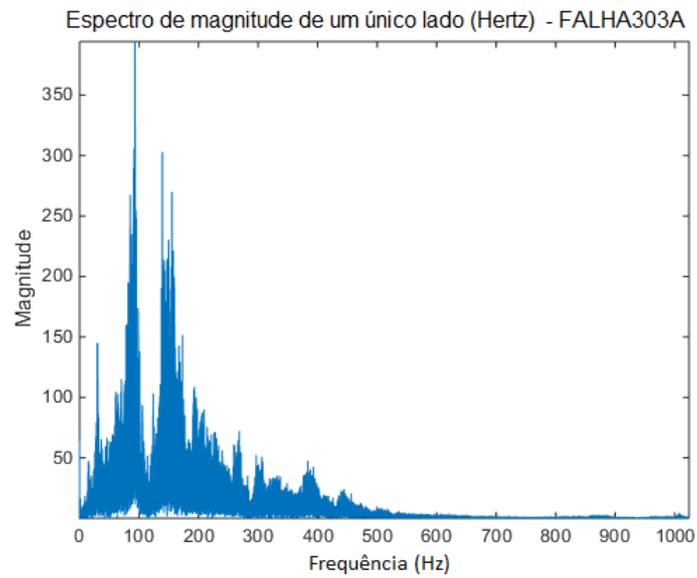
Figura 38: FFT dos sinais de vibrações analisados

## 4.2 Engrenagem cilíndrica com dentes pouco desgastados - Grupo de sinais: FALHA300A

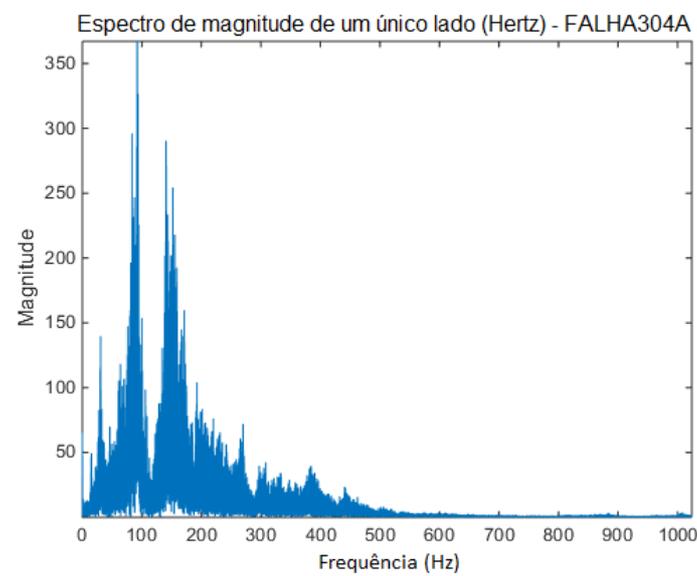
Para efeitos de investigação, é sabido que este sinal é obtido a partir de uma parte com defeito e deve então ser comparado com uma parte em boas condições. Os sinais FALHA303A Figura 39(a), FALHA304A Figura 39(b), e FALHA305A Figura 39(c) representam o grupo de falhas com dentes pouco desgastados e formam o padrão mostrado na Tabela 6

Aqui a análise de Tempo-Frequência possibilitou que houvesse uma distinção desta classe com falhas conhecidas onde foi possível a associação e comparação dos sinais de amplitude e frequência, onde a amplitude média é de 0,28 V e frequência média de 98 Hz.

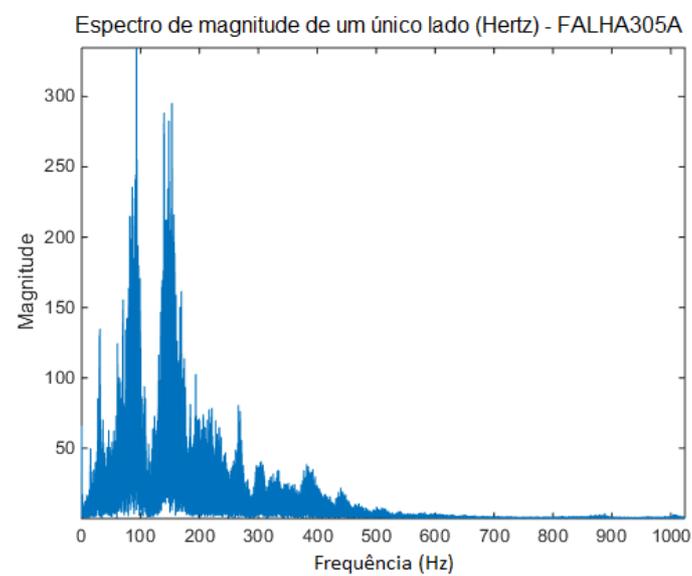
Para esta falha, os parâmetros foram calculados a partir de 15.000 amostras. Este sinal demonstra que entre amostras de um mesmo sinal tem-se variação na média, na energia e no desvio.



(a) Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA303A



(b) Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA304A



(c) Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA305A

Figura 39: Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - Sinais Grupo FALHA300A

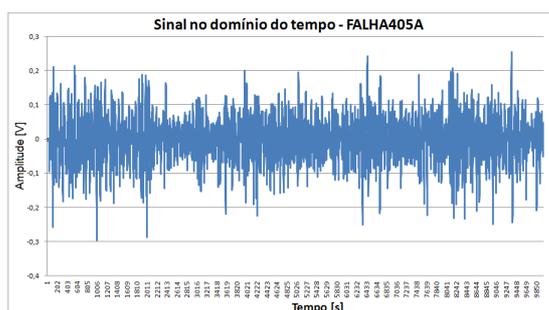
Tabela 6: Tabela de Resultados - Grupo FALHA300

Tabela de Resultados - Grupo FALHA300			
Sinais	Descrição	Unidades	
		Amplitude [V]	Frequência [Hz]
FALHA	FALHA301A	0,25	90,00
	FALHA302A	0,23	120,00
	FALHA303A	0,30	90,00
	FALHA304A	0,27	100,00
	FALHA305A	0,25	90,00
	FALHA306A	0,25	130,00
	FALHA307A	0,30	90,00
	FALHA308A	0,30	90,00
	FALHA309A	0,30	90,00
	FALHA310A	0,35	90,00
	Média	0,28	98,00

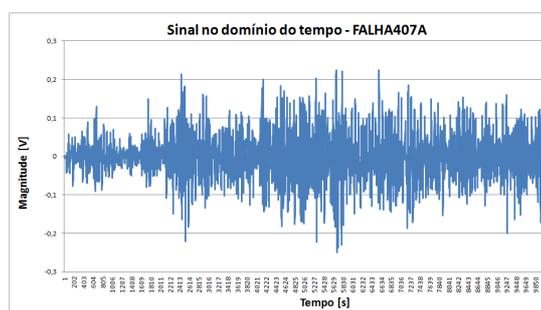
### 4.3 Engrenagem cilíndrica com excessivo desgaste nos dentes - Grupo de sinais: FALHA400A

Ate agora, todos os dados apresentam uma quantidade relativa de informação adequada para realizar a análise e interpretação do futuro, usando um modelo preditivo, tais como auto-regressivo (AR) e de média móvel (MA). Neste caso, no entanto, a proposta é reduzir o número de amostras e manter as mesmas possibilidades de interpretação. A análise de dados destina-se a verificar se estes métodos de confiabilidade podem ser caracterizados pelo uso de pequenas amostras.

Os sinais apresentados nas Figuras 40(a) e 40(b) representam estes sinais no domínio do tempo.



(a) FALHA405A no domínio do tempo



(b) FALHA407A no domínio do tempo

Figura 40: Falhas no domínio do tempo

As figuras 41 e 42 apresentam estes sinais no domínio da frequência.

Neste grupo a análise de Tempo-Frequência realizada entre os sinais permitiu que a criação da tabela 7 onde a amplitude média é de 0,27 V e frequência média de 53 Hz.

A função densidade de probabilidade aparece na figura 43.

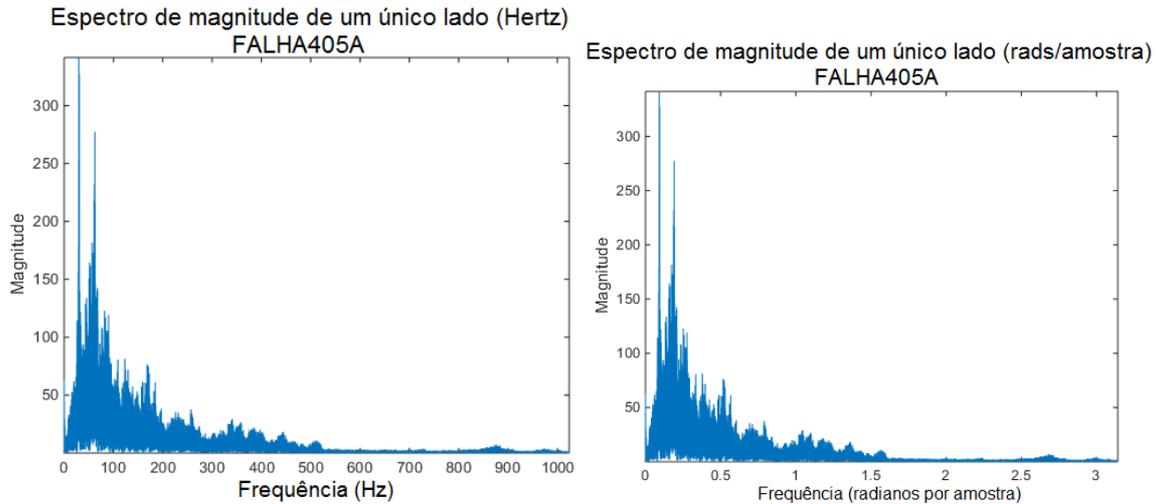


Figura 41: Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA405A

Figura 42: Espectro de Magnitude de um lado (rads/amostra) - FALHA405A

Tabela 7: Tabela de Resultados - Grupo FALHA400

Tabela de Resultados - Grupo FALHA400			
Sinais	Descrição	Unidades	
		Amplitude [V]	Frequência [Hz]
FALHA	FALHA401A	0,15	50,00
	FALHA402A	0,17	50,00
	FALHA403A	0,20	50,00
	FALHA404A	0,25	50,00
	FALHA405A	0,20	50,00
	FALHA406A	0,25	50,00
	FALHA407A	0,35	50,00
	FALHA408A	0,40	60,00
	FALHA409A	0,35	60,00
	FALHA410A	0,35	60,00
	Média	0,27	53,00

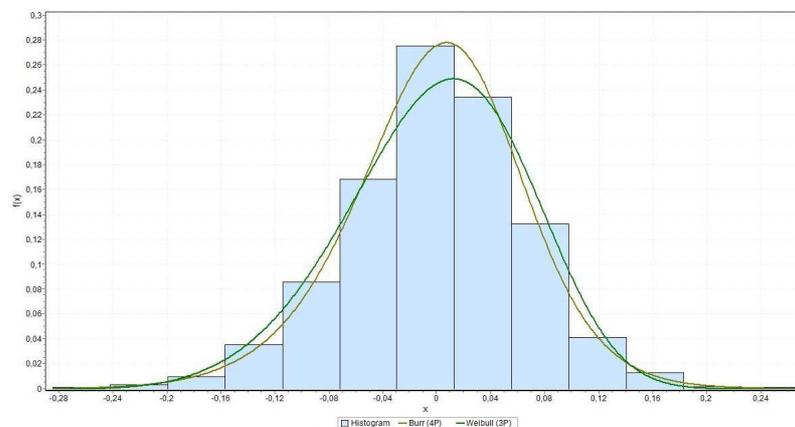
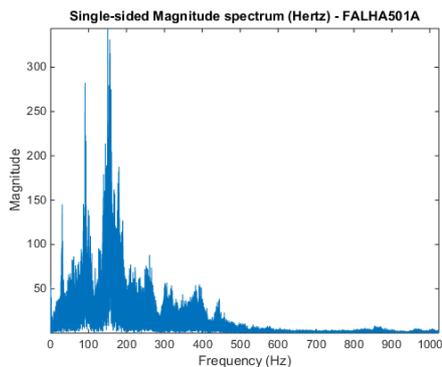
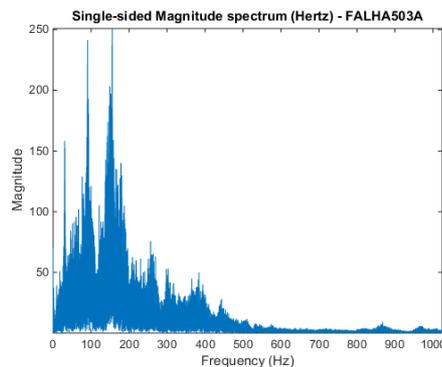


Figura 43: Função Densidade Probabilidade(PDF) - FALHA403A

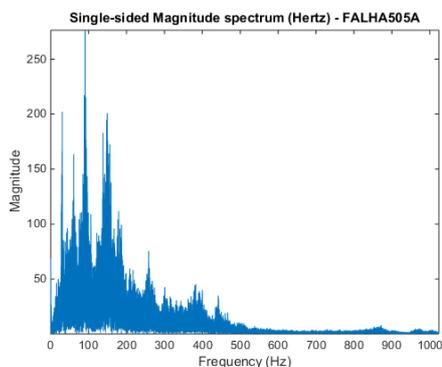
#### 4.4 Engrenagem cilíndrica com dente quebrado - Grupo de sinais: FALHA500A



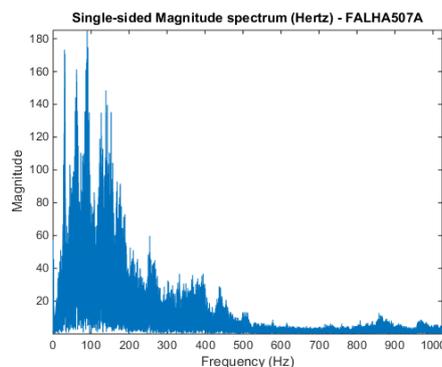
(a) Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA501A



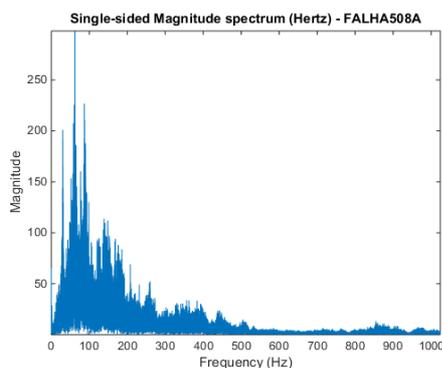
(b) Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA503A



(c) Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA505A



(d) Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA507A



(e) Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) - FALHA508A

Figura 44: Espectro de Magnitude de um lado (Hertz) do grupo de FALHA500

Este grupo de falhas refere-se a uma engrenagem quebrada com uma carga maior. Estes gráficos individualizados são relevantes para fazer comparações relativas as informações obtidas. Foram utilizados sinais com 50 mil dados, 20 mil e menores, ou seja, para um sinal com essas características uma amostragem menor é o suficiente para identificar qual a falha aconteceu.

As Figuras 44 representam o conjunto de sinais no domínio da frequência e estes podem ser observados também em rad/amostras conforme Figura 45.

Espectro de magnitude de um único lado (rads/amostra)  
FALHA506A

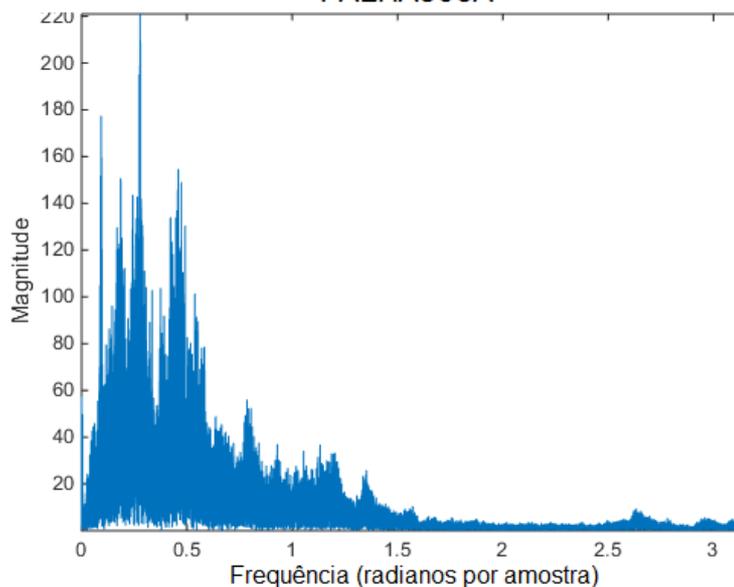


Figura 45: Espectro de Magnitude de um lado (rads/amostra) - FALHA506A

O grupo de sinais apresenta uma amplitude média de 0,24 V e frequência média de 127,5 Hz que podem ser visualizados na Tabela 8

Tabela 8: Tabela de Resultados - Grupo FALHA500

Tabela de Resultados - Grupo FALHA500			
Sinais	Descrição	Unidades	
		Amplitude [V]	Frequência [Hz]
FALHA	FALHA501A	0,30	190,00
	FALHA502A	0,35	195,00
	FALHA503A	0,25	150,00
	FALHA504A	0,22	150,00
	FALHA505A	0,20	150,00
	FALHA506A	0,16	150,00
	FALHA507A	0,18	100,00
	FALHA508A	0,25	90,00
	FALHA509A	0,25	50,00
	FALHA510A	0,25	50,00
	Média	0,24	127,50

#### 4.5 Comparações relativas aos sinais analisados

A vibração é uma característica mecânica do atuador e portanto ela aparecerá quando este estiver em funcionamento. Cada engrenagem com defeitos conhecidos ou em boas condições de funcionamento gerou uma frequência característica e uma amplitude medida em volts também. Estas medidas podem ser melhor visualizadas na Tabela 9 que resume o comportamento das engrenagens no domínio da frequência.

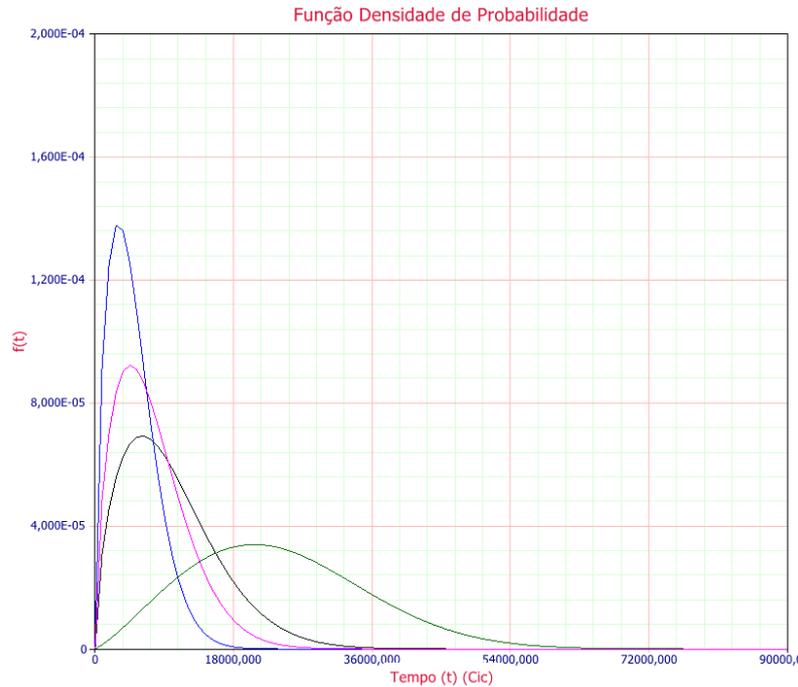


Figura 46: Função Densidade de Probabilidade de 4 sinais de vibração

Tais informações podem ser agrupadas e apresentadas de acordo com a Tabela de parâmetros 9.

Ao termos o conhecimento das características mecânicas da engrenagem e ao coletarmos o sinal de vibração associamos essa frequência e amplitude a condição da engrenagem e representamos com uma assinatura do sinal, ou seja, assinatura da condição conhecida.

Estas variações podem ser usadas de forma diferentes para a identificação dos tempos de falhas em sistemas logísticos completos. Considerando o tempo de produção, transporte e substituição e a distância entre o fabricante da peça substituída e o cliente final esse tempo é importante em toda a cadeia logística da manutenção.

Sinais	Descrição	Un.	Denominação/Valores										Médias
NORMAL	Sinal		NORMAL01	NORMAL02	NORMAL03	NORMAL04	NORMAL05	NORMAL06	NORMAL07	NORMAL08	NORMAL09	NORMAL10	
	Amp.	[V]	0,25	0,25	0,24	0,30	0,30	0,34	0,37	0,35	0,35	0,37	0,31
	Freq.	[Hz]	190,00	180,00	190,00	190,00	190,00	190,00	190,00	190,00	190,00	190,00	189,00
FALHA300	Sinal		FALHA301	FALHA302	FALHA303	FALHA304	FALHA305	FALHA306	FALHA307	FALHA308	FALHA309	FALHA310	
	Amp.	[V]	0,25	0,23	0,30	0,27	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30	0,35	0,28
	Freq.	[Hz]	90,00	120,00	90,00	100,00	90,00	130,00	90,00	90,00	90,00	90,00	98,00
FALHA400	Sinal		FALHA401	FALHA402	FALHA403	FALHA404	FALHA405	FALHA406	FALHA407	FALHA408	FALHA409	FALHA410	
	Amp.	[V]	0,15	0,17	0,20	0,25	0,20	0,25	0,35	0,40	0,35	0,35	0,27
	Freq.	[Hz]	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	60,00	60,00	60,00	53,00
FALHA500	Sinal		FALHA501	FALHA502	FALHA503	FALHA504	FALHA505	FALHA506	FALHA507	FALHA508	FALHA509	FALHA510	
	Amp.	[V]	0,30	0,35	0,25	0,22	0,20	0,16	0,18	0,25	0,25	0,25	0,24
	Freq.	[Hz]	190,00	195,00	150,00	150,00	150,00	150,00	100,00	90,00	50,00	50,00	127,50

Tabela 9: Tabela de sinais agrupados

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo estudar de forma preliminar a viabilidade do uso da metodologia de testes de vida acelerado aplicado em atuadores elétricos com a utilização e analogia do reconhecimento de assinaturas de falhas.

A partir do desenvolvimento deste trabalho concluiu-se que a realização de pesquisa de campo pode ser realizada por meio de poucos recursos, sendo viabilizada com algumas peças disponíveis para testes, assim como boas técnicas e informação para estudos e análises.

A vibração é um fenômeno indesejável porque gasta muita energia, provocando estresse e ruídos.

Os procedimentos de ensaios aqui desenvolvidos converteram matematicamente os sinais do domínio do tempo ao domínio da frequência, usando transformadas de Fourier. Essa análise é mais comumente usada para essa aplicação, por fornecer a magnitude em decibéis (dB) e a fase associada (graus ou radianos) de cada componente de frequência presente em um sinal. Com isso foi possível reconhecer os sinais em diferentes níveis de depreciação das engrenagens. Isto pode ser considerado uma variação das técnicas usuais de ensaios acelerados mantendo-se o objetivo de reduzir o tempo de execução dos experimentos identificando a confiabilidade de peças e componentes.

O método de aceleração de vidas leva o equipamento a níveis de exaustão e depreciação e a medida que esses níveis vão sendo atingidos os sinais coletados vão sendo observados é realizada a identificação das peças e os defeitos característicos. Ocorre que este método exige muitos recursos financeiros para execução dos mesmos. Em um método de aceleração tradicional como aparece na Figura 47 a degradação é controlada e os níveis de vibração são coletados, analisados sendo identificados quais peças e quais características de falhas são observadas, sendo registrados e comparados as falhas com os respectivos sinais de vibração. Nesse método a degradação entre um ponto e outro é acrescida de uma quantidade de energia que acrescenta outros fatores como aumento de temperatura e a transmissão de vibração para outras peças associadas a engrenagem. Este fenômeno está demonstrado e caracterizado entre os pontos 2 e 3 da Figura 47.

Já no método aqui proposto as engrenagens inseridas são analisadas pontualmente em um determinado tempo onde o defeito já é conhecido e os sinais de vibração foram identificados para darem a assinatura daquele ponto. Algumas vantagens neste método:

- Caracteriza-se por manter apenas uma falha para ser analisada em cada experimento;
- Associa diretamente o sinal de vibração a falha pré-estabelecida;
- Não danifica o conjunto atuador, permitindo a repetição do experimento;

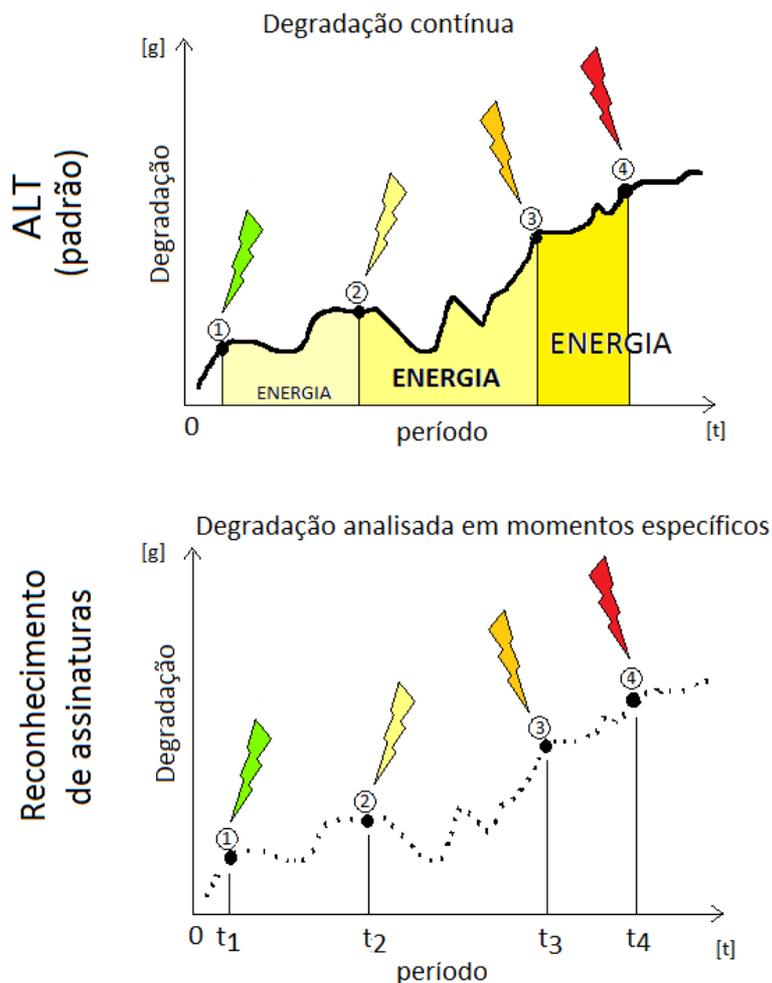


Figura 47: Comparações entre as análises

Este método propõe reconhecer os diferentes níveis de vibração, sem necessariamente passar por todos outros níveis, como exemplo podemos citar que para testar uma engrenagem muito desgastada (ponto 3 na Figura 47) não é necessário passar por uma engrenagem pouco desgastada (ponto 2 na Figura 47).

A técnica baseou-se no conhecimento das condições de ensaios severas bem como das condições normais de uso. Uma das características prévias adotadas foi a definição dos ensaios de modo a não alterar as condições normais de uso do equipamento.

Este trabalho possibilitou a observação que a utilização de amostras pequenas também permite a análise dos dados sem perdas de informações, isto ocorreu devido a dinâmica do sistema mecânico.

Devido à enorme quantidade de informações obtidas a partir do sistema, este método pode e deve ser testado repetidas vezes, a fim de esgotar todas as possibilidades, uma vez que lida-se com a confiabilidade de equipamentos muito complexos <sup>1</sup>

Naturalmente que esse trabalho proposto tem limitações e precisa passar por novos testes com sucessivas melhorias para ajustar a metodologia de testes proposta. Algumas limitações podem ser destacadas como a possibilidade real de uma peça defeituosa transmitir sua vibração para outras, transformando uma análise individual e simples em uma

<sup>1</sup>A classificação de complexidade de equipamentos pode ser identificada pelo número de componentes, como por exemplo a norma MIL-HDBK-781(1996), sobre a complexidade de sistemas eletrônicos

análise mais criteriosa.

Em um segundo momento para tornar o sistema completo, é necessário implementar estas mesmas etapas em outras peças, como por exemplo escolha de outros elementos de máquinas para análise vibracional, de forma que possam ser comparados procedimentos e resultados.

Outras possibilidades se abrem para trabalhos futuros é o acréscimo de outros elementos de estresse para identificação de falhas, como por exemplo a temperatura; e a utilização de outros modelos de aumento de carga para testes não usuais.

Devido a complexidade e abrangência desta área explorada, muitas possibilidades se abrem para pesquisas e trabalhos futuros.

Esse modelo permite que se tenha uma boa confiabilidade em seus resultados visto que os testes comprovam a tendência do comportamento das peças com defeitos.

A Figura 35 apresenta um resumo da metodologia proposta nesse trabalho que será utilizada para coletar resultados da bancada para possíveis refinamentos ao longo do projeto BRAGECRIM. Considerando que há uma possibilidade matemática, devido as características mecânicas das engrenagens Uma inferência que podemos utilizar é que para saber como um sinal anterior se comporta em um período futuro, é necessário calcular um fator de aceleração entre o nível mais baixo e o mais alto nível de energia, de modo a identificar o que seria a próxima falha em conformidade com a identificação do novo modelo de vibração. Por exemplo, quando uma vibração é caracterizado pelo valor 0,058332 V e o próximo estresse é reconhecido pelo valor 0,065978 V, que também é um sinal e, por conseguinte, uma falha conhecida. Diversos softwares permitem converter a tensão adquirida em dados de frequência, usando funções de análise espectral (domínio da frequência) com isso podemos executar um processamento de software mais avançado nos dados, usando uma das muitas ferramentas disponíveis no mercado.

Também é possível concluir que a confiabilidade deve ser projetada não somente para as peças, componentes e produtos como também para os processos de desenvolvimento dos equipamentos.

Este trabalho gerou o artigo *Accelerated Life Test for Integration of Supply Chain Planning and Intelligent Systems* que pode ser visto no apêndice B e será apresentado no 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, entre os dias 28 e 30 de junho de 2016, na Universidade de Tecnologia em Troyes, França.

## REFERÊNCIAS

- AFFONSO, L. O. A. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 356 p.
- AKIIKE, A. Where is Abernathy and Utterback Model ? **Annals of Business Administrative Science**, Tokio, v.12, n.5, p.225–236, Nov 2013.
- ALMEIDA, L. F. de. **Redes neurais artificiais aplicadas à manutenção baseada na condição**. 2011. 162 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011.
- ALVARADO, R. U. Aplicação da distribuição Poisson zero truncada à produtividade de autores. **Perspectivas em ciência da informação**, Belo Horizonte, v.9, n.1, p.18–33, Mar 2008.
- ALVES, J. L. **Módulo Weibull**. 2016. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia. Disponível em: [http://www.sucena.eng.br/IME/Mod5\\_Weibull12008.pdf](http://www.sucena.eng.br/IME/Mod5_Weibull12008.pdf). Acesso em: 02 Set. 2016.
- AZEVEDO, C. B. **Metodologia Científica ao alcance de todos**. 2ª.ed. São Paulo: Manole, 2009. 72 p.
- BENGTSSON, M. **Standardization issues in condition based maintenance**. Vasteras: Málardalen University, 2003. 118 p. n.36.
- BENGTSSON, M. **Condition based maintenance systems: an investigation of technical constituents and organizational aspects**. Vasteras: Arkitektkopia, 2004. 118 p.
- BENGTSSON, M. **On condition based maintenance and its implementation industrial settings**. 2007. 101 p. Thesis (Doctoral) — Malardalen University. Department of Innovation. Design and Product Development, Malardalens, 2007.
- BERTOLO, L. A. **Estatística: distribuição de probabilidades**. 2015. 21p. (Apostila). Disponível em: <http://www.bertolo.pro.br/FinEst/Estatistica/DistribuicaoDiscreta.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2015.
- BINOTI, D. H. B. et al. Eficiência das funções weibull e hiperbólica para descrição de distribuições diamétricas de povoamentos de *Tectona grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.2, p.299–306, Jun 2011.

- BÖESCH, K. **Detecção de falhas por fusão de sensores em atuadores elétricos: correlação entre sinais de torque e vibração**. 2011. 108 p. Trabalho de conclusão (Graduação) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2011.
- BOSA, J. L. **Sistema embarcado para a manutenção inteligente de atuadores elétricos**. 2009. 169 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Informática. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, 2009.
- HUNTER, W. G. (Ed.). **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building**. 2<sup>a</sup>.ed. New York: Wiley, 1978.
- CALADO, V. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003. 260 p.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. São Paulo: Artmed, 2009. 253 p.
- CANTO, L.; LOURA, C.; MARTINS, M. E. G. Introdução à Probabilidade. In: PROJETO REANIMAT, 2003, Lisboa. **Anais...** Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2003.
- CAPES, F. **Programa Bragecrim**. 2016. Disponível em: <<http://www.capes.gov.br/cooperacao-internacional/alemanha/bragecrim>>. Acesso em: 17 jun. 2015.
- COESTER, A. **Manual Actuador - Linha CSR (CSR6 - CSR16)**. 01.ed. São Leopoldo: [s.n.], 2001. 24 p. n.007. (Serie MN).
- COESTER, A. **Manual Actuador - Technical Summary**. I.ed. São Leopoldo: [s.n.], 2007. 20 p. n.01. (CSR).
- COESTER, A. ao. **Atuadores elétricos: soluções integradas em automação de válvulas**. 01.ed. São Leopoldo: [s.n.], 2010. 32 p. n.01. (MN007, v.1.0).
- COSTA, M. C. B. A importância do ensino da ferramenta de planejamento fatorial para estudantes de engenharia. In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 2011, Blumenau. **Anais...** COBENGE, 2011. v.3, p.1–7.
- DHILLON, B. S. **Engineering maintenance: a modern approach**. New York: CRC Press, 2002. 224 p.
- ESTATCAMP, E. **Software Action**. São Carlo: ESTACAMP, 2014. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/probabilidades/62-distribuicao-normal>>. Acesso em: 09 fev. 2016.
- FACCIN, F. C. **Manutenção inteligente: fusão de sensores aplicada na detecção de falhas em atuadores elétricos**. 2011. 155 p. Trabalho de conclusão (Graduação) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2011.

- GAMA, C. Dinis da; BARROSO, F.; NAVARRO TORRES, V. Ruído e vibrações inerentes ao avanço de uma obra geotécnica urbana - Cais do Sodré. **Centro de Geotecnia**, Lisboa, v.4, n.2, p.459–467, Mar 2016.
- GONÇALVES, L. F. **Desenvolvimento de um sistema de manutenção embarcado**. 2011. 155 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Elétrica. (Área: Microeletrônica), Porto Alegre, 2011.
- GONÇALVES, L. F. et al. Um método de classificação de falhas em atuadores elétricos baseado em mapas auto-organizáveis. **Programa de Pós-Graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre**, Porto Alegre, v.1, n.1, Jan. 2007.
- KIRITSIS, D. Product lifecycle management and embedded information devices. **Springer Handbook of Automation**, Berlin, Heidelberg, v.10, n.7, p.749–765, Mar 2009.
- LAZZARETTI, E. P. **Avaliação de desempenho de implementações em hardware e software de algoritmos para aplicações de manutenção inteligente**. 2012. 96 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2012.
- LEE, J. E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Milwaukee, v.19, n.6, p.501–507, Dec 2003.
- LEE, J. et al. Intelligent prognostics tools and e-maintenance. **Computers in industry**, Amsterdam, v.57, n.6, p.476–489, 2006.
- LEE, K.; GAO, R.; SCHNEEMAN, R. Sensor network and information interoperability integrating IEEE 1451 with MIMOSA and OSA-CBM. **IEEE-Institute of Electrical and Electronics Engineers**, California, v.2, n.1, p.1301–1305, Aug 2002.
- LEITÃO, G. **Probabilidade e Estatística**. 2010. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Natal. Rio Grande do Norte, Brasil. Disponível em <<http://www.dca.ufrn.br/~guga/downloads/pes/aulas/Aula6.pdf>> Acesso em 05 out 2015.
- LINO, F. et al. **Caracterização da distribuição de Weibull em ambientes indoor**. 2008. 108 p. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Programa de Pós Graduação do Curso de Engenharia Elétrica. (Área de concentração Gestão de redes e serviços), Campinas, 2008.
- LO, C.; WONG, Y.-K.; RAD, A. B. Intelligent system for process supervision and fault diagnosis in dynamic physical systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, California, v.53, n.2, p.581–592, Apr 2006.
- MERCÊS MACHADO, R. N. das. **Detecção, classificação e quantificação automática de variações de tensão de curta duração para aplicação em análise de pós-operação em sistemas de energia elétrica**. 2006. 158 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Pará. Centro Tecnológico. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2006.

MILANEZI, G. M. **Gestão da qualidade no processo de remanufatura de componentes ferroviários**. 2012. 159 p. Monografia de Especialização (Especialista no Transporte Ferroviário de Cargas) — Instituto Militar de Engenharia. Departamento de Ciência e Tecnologia. Curso de Especialização no transporte ferroviário de cargas, Rio de Janeiro, 2012.

MIMOSA, M. I. M. O. S. A. **An Operations and Maintenance Information Open System Alliance - Open System Architecture for Condition-Based Maintenance**. 2015. Disponível em <<http://www.mimosa.org/mimosa-osa-cbm>>. Acesso em: 28 dec. 2015.

MUNSTER, U. et al. **I2MS2C - Integrating Intelligent Maintenance Systems and Spare Parts Supply Chains**. 2016. Disponível em: <<http://i2ms2c.uni-muenster.de/node/add%20/project>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

NATIONAL. **Medição de som e vibração: guia prático**. 2016. Disponível em: <<http://www.ni.com/tutorial/7110/pt/>>. Acesso em: 24 mar. 2016.

NELSON, W. A Survey of Methods for Planning and Analyzing Accelerated Tests. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, Schenectady. New York, v.EI-9, n.1, p.12–18, Mar 1974.

NELSON, W. B. **Accelerated Testing-Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses**. Michigan: A John Wiley & Sons, Inc, 2004. 616 p. (Wiley Series in Probability and Statistics, v.1).

NELSON, W. B. An Updated Bibliography of Accelerated Test Plans. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM (RAMS), 2015, Palm Harbor. **Anais...** New York: IEEE, 2015. p.1–6.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: aplicações na ciência e na indústria**. Campinas: Bookman, 2010. 414 p.

NIPPASHI, H. N.; HENRIQUES, R. V. B.; PEREIRA, C. E. Classificação do estado de desgaste do sistema utilizando Mapas de Kohonen. **SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, Ceará, v.19, n.6, p.16–21, Dec. 2013.

PARKER, H. C. **Proportional Regulator MPT40 - 1/8 "1/4" ported**. Estocolm: [s.n.], 2006. Catalogue no. PDE2534TCUK-ab. 2006. Disponível em: <[www.parker.com/euro\\_pneumatic](http://www.parker.com/euro_pneumatic)>. Acesso em: 04 jul. 2015.

PENA, M. C. M. **Falhas em transformadores de potência: uma contribuição para análise, definições, causas e soluções**. 2003. 148 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Itajubá, 2003.

PICCOLI, L. B. et al. Uma solução embarcada para a predição e detecção de falhas em válvula de transmissão de petróleo e derivados. **UFRGS-Grupo de Controle e Automação e Robótica**, Porto Alegre, v.10, n.6, p.8–14, Set. 2012.

PICCOLI, L. B. et al. Embedded Systems Solutions for Fault Detection and Prediction in Electrical Valves. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Cham, v.19, n.6, p.493–504, Dec 2015.

PINTO, C. V. Introdução ao Planejamento da Manutenção em Empresas Industriais. **Datainvest**, Lisboa, v.19, n.6, p.100–110, Jan 1986.

PORTNOI, M. **Probabilidade, Variáveis Aleatórias, Distribuição de Probabilidades e Geração Aleatória**. 2005. Disponível em: <[http://scholar.google.com.br/scholar?q=Marcos+Portnoi+%2Bprobabilidade+%2Bdistribui%C3%A7%C3%A3o+normal&hl=pt-BR&as\\_sdt=0,5](http://scholar.google.com.br/scholar?q=Marcos+Portnoi+%2Bprobabilidade+%2Bdistribui%C3%A7%C3%A3o+normal&hl=pt-BR&as_sdt=0,5)>. Acesso em: 13 out. 2015.

RAMOS, P. L. **Aspectos computacionais para inferência na distribuição Gama Generalizada**. 2014. 338 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Faculdade de Ciências e Tecnologia, São Paulo, 2014.

RASTEGARI, A. et al. Condition Based Maintenance in Manufacturing Industries: introducing current industrial practice and challenges. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION RESEARCH, ICPR 2013, 22., 2013, Curitiba. **Anais...** Digital Vetenskapliga Arkivet, 2013.

REIS, L. O. R.; ANDRADE, J. Análise de falhas e da posição na curva da banheira de moldes empregados em equipamentos de injeção. **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Salvador, v.3, n.5, p.1–11, Out 2009.

RELIASOFT, B. **Conceitos de Confiabilidade - Características da Distribuição Weibull**. 2005. Disponível em <[http://www.portal-energia.com/downloads/aulas/Weibull\\_Topicos.pdf](http://www.portal-energia.com/downloads/aulas/Weibull_Topicos.pdf)>. Acesso em Maio 03, 2015.

RELIASOFT, C. **Quantitative Accelerated Life Testing Data Analysis**. 2015. Disponível em: <<http://www.weibull.com/basics/accelerated.htm>>. Acesso em: 18 jul. 2015.

RIBEIRO, D.; CATEN, C. S. T. **Estatística industrial**. 2000. Disponível em: <[http://scholar.google.com.br/scholar?q=Estat%C3%ADstica+industrial&btnG=&hl=pt-BR&as\\_sdt=0%2C5](http://scholar.google.com.br/scholar?q=Estat%C3%ADstica+industrial&btnG=&hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5)>. Acesso em: 30 mai. 2015.

RODRIGUES, J. A.; CHAVES, L. M.; CASTELLARES, F. Uma nova classe de distribuições generalizadas. **TEMA (São Carlos)**, São Carlos, v.13, n.2, p.167–178, Jul 2012.

SCHREIBER, R. G. (Ed.). **Elementos de transmissão**. Gravataí: Sistema FIERGS, 2014. 74 p.

SEMENTE, R. **Séries de Fourier. Transmissão de dados. Aula 4**. Unidade I. 2011. 17 p. (Apostila). Disponível em: <[www.uern.br/professor/arquivo\\_baixar.asp?arq\\_id=5693](http://www.uern.br/professor/arquivo_baixar.asp?arq_id=5693)>. Acesso em: 30 out. 2015.

SHEPPARD, J. W.; KAUFMAN, M. A. IEEE 1232 and 1522 Standards. **IEEE-Institute of Electrical and Electronics Engineers**, California, v.1, n.3, p.388–397, Sep 2000.

SILVA, C. M. e; CAVALCANTE, A.; VIRGÍNIO, A. **Modelo para o planejamento de manutenção baseado em parâmetros de degradação**. 2010. Disponível em: <[http://scholar.google.com.br/scholar?q=%22Modelo+para+o+planejamento+de+manuten%5C%7Bc%7D%5C%7E%7Ba%7D+baseado+em+par%5C%5E%7Ba%7Dmetros+de+degrada%5C%7Bc%7D%5C%7E%7Ba%7D&btnG=&hl=pt-BR&as\\_sdt=0%2C5](http://scholar.google.com.br/scholar?q=%22Modelo+para+o+planejamento+de+manuten%5C%7Bc%7D%5C%7E%7Ba%7D+baseado+em+par%5C%5E%7Ba%7Dmetros+de+degrada%5C%7Bc%7D%5C%7E%7Ba%7D&btnG=&hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5)>. Acesso em: 17 mar. 2015.

SILVA, J. H. F. d. **Otimização de parâmetros em soldagem MIG sinérgico pulsado usando análise estatística de redes neurais**. 1996. 108 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Brasília, 1996.

STACY, E. W. A generalization of the gamma distribution. **The Annals of Mathematical Statistics**, New York, v.33, n.3, p.1187–1192, Sep 1962.

SUCENA, M. P. **Engenharia de Manutenção**. 2008. Disponível em: <[http://www.sucena.eng.br/IME/Mod5\\_Weibull2008.pdf](http://www.sucena.eng.br/IME/Mod5_Weibull2008.pdf)>. Acesso em: 13 set. 2015, Curso de especialização em Transporte Ferroviário de Cargas do Instituto Militar de Engenharia - IME.

TREVISAN, R. **Utilização de medições ultrassônicas de vibração e da emissão acústica para implantação de lubrificação base condição visando a prevenção de falhas em mancais de rolamentos**. 2011. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/35619>. Acesso em: 24 jun. 2015.

UTTERBACK, J. M.; ABERNATHY, W. J. A dynamic model of process and product innovation. **Omega**, Amsterdam, v.3, n.6, p.639–656, Jul 1975.

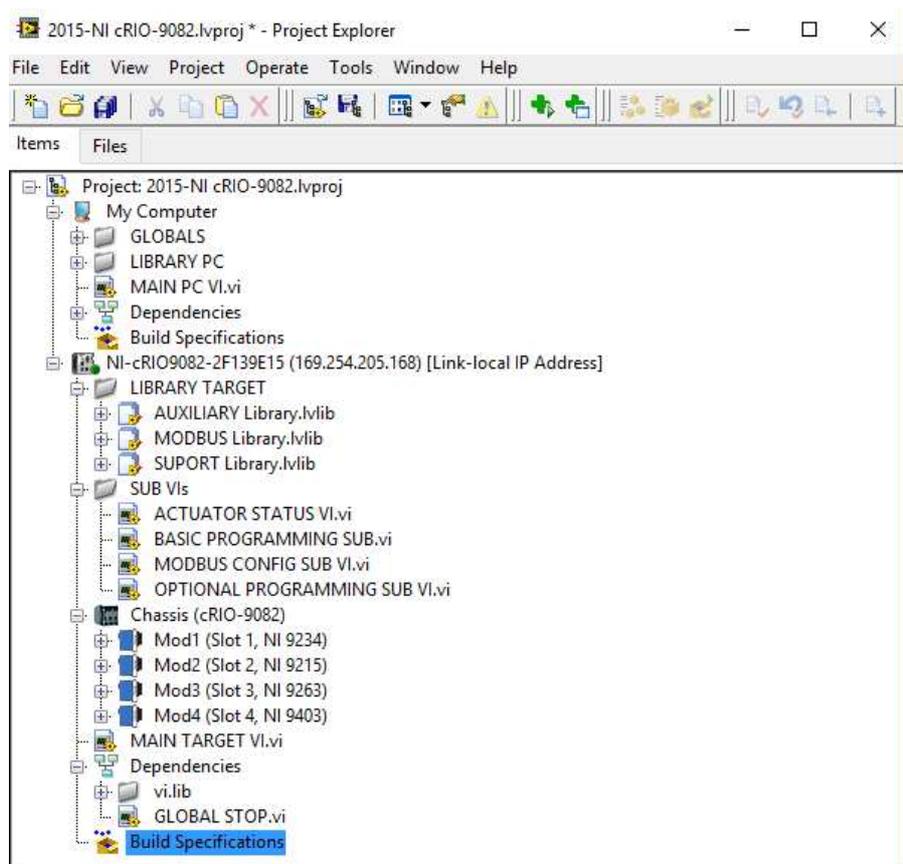
WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo. **Fundação Christiano Ottoni**, Belo Horizonte, v.1, n.6, p.12–18, Nov 1996.

YAM, R. C. M. et al. Intelligent Predictive Decision Support System for Condition-Based Maintenance. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v.17, n.5, p.383–391, Feb 2001.

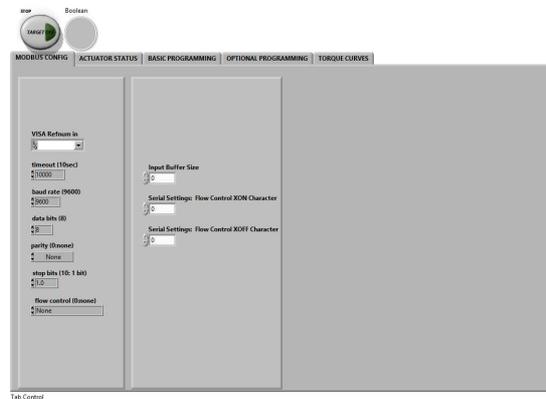
## APÊNDICE A INTERFACE LABVIEW® PARA *DATALOGGER*

Interface desenvolvida em LabVIEW®, embarcada no controlador cRIO-9082 / NATIONAL™ para controle do atuador e coleta de dados dos sinais de vibração.

### A.1 Árvore estrutural de programação ambiente LabVIEW/NATIONAL™



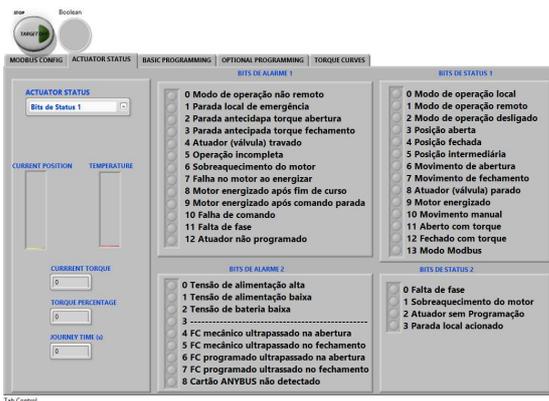
## A.2 Abas da estrutura de programação ambiente LabVIEW/NATIONAL™



Tab Control

Figura 48: \*

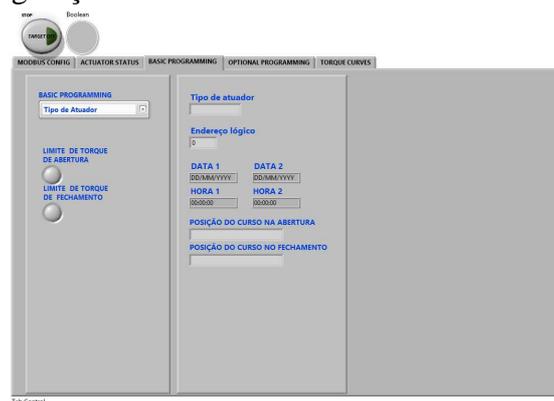
Interface - Aba: Configuração MODBUS



Tab Control

Figura 49: \*

Interface - Aba: Status do Atuador



Tab Control

Figura 50: \*

Interface - Aba: Configuração Básica



Tab Control

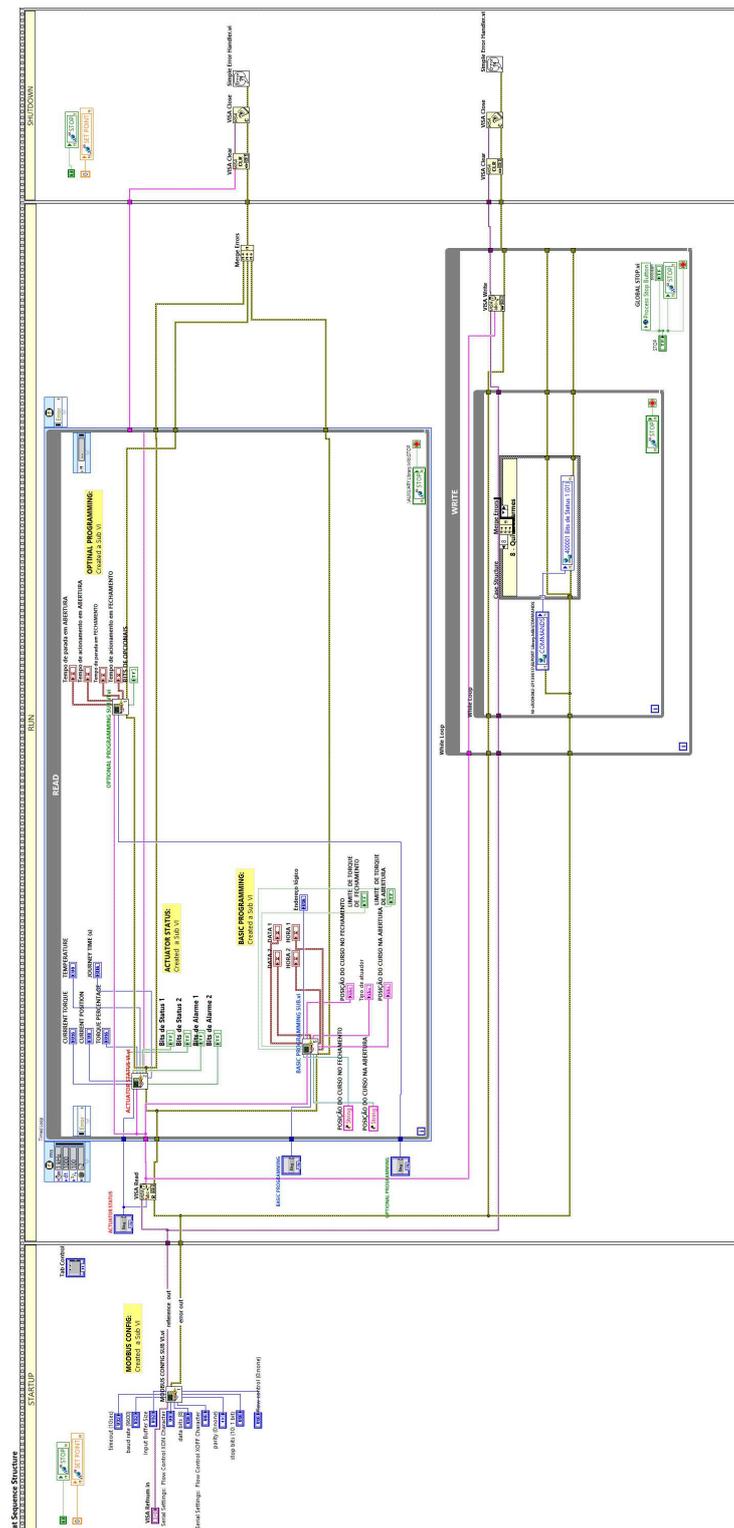
Figura 51: \*

Interface - Aba: Programação de Opcionais

### A.3 Diagrama de blocos da programação no ambiente LabVIEW/NATIONAL <sup>TM</sup>

O diagrama apresentado neste anexo representa o bloco principal onde são associados todos os blocos desenvolvidos no ambiente gráfico.

Assim, por exemplo, ao adicionarmos um módulo físico (*hardware*) de AI no controlador, cria-se um bloco lógico para utilização deste módulo, e assim sucessivamente. Esses são considerados sub-blocos ou subprogramas da programação principal.



# APÊNDICE B ARTIGO -ACCELERATED LIFE TEST FOR INTEGRATION OF SUPPLY CHAIN PLANNING AND INTELLIGENT SYSTEMS

## Accelerated Life Test for Integration of Supply Chain Planning and Intelligent Systems

C. G. M, Rocha \* R. V. B, Henriques\*\* C. E., Pereira\*\*\*

\* Federal University of Rio Grande do Sul, Osvaldo Aranha, 103, Porto Alegre, Brasil (e-mail: clayton.rocha@ufrgs.br).

\*\* Federal University of Rio Grande do Sul, Osvaldo Aranha, 103, Porto Alegre, Brasil (e-mail: rventura@ecc.ufrgs.br)

\*\*\* Federal University of Rio Grande do Sul, Osvaldo Aranha, 103, Porto Alegre, Brasil(e-mail: cpereira@ecc.ufrgs.br)

**Abstract:** In modern Intelligent Maintenance Systems, the quality of a machine or equipment also depends on the reliability and safety support. Sometimes these requirements are not met and the machine may then be unavailable. This paper aims to describe an approach for using accelerated life testing to support the operational life stage in order to determine the product lifecycle stages. The proposed approach was built upon previous experiences based on the project Integrating Intelligent Maintenance Systems and Spare Parts Supply Chains I2MS2C. Our goal is to present the preliminary results we have gotten to date by using the ReliaSofts ALTA™ software to identify the product lifecycle stages for specific parts of an electric actuator.

**Keywords:** Accelerated Life Test, Intelligent manufacturing systems, Maintenance engineering.

### 1. INTRODUCTION

Product lifecycle can be divided basically into three phases (Figure 1): Beginning-of-Life (BOL), Middle-of-Life (MOL), and End-of-Life (EOL).

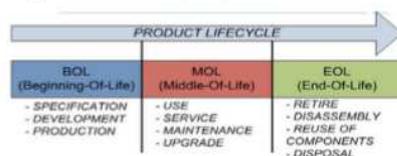


Fig. 1. Product lifecycle

Regarding the project Integrating of Intelligent Maintenance Systems and Spare Parts Supply Chains I2MS2C, we are most interested in the MOL stage where the manufactured products are delivered to end users; the products can be used, maintained, and serviced either by customers or some aftermarket service, as well as a third-party service provider. Kiritsis (2009). This project shows the preliminary results obtained by running the electric valve-actuator assembly, at higher levels than usual, by the means of some minimum sort of accelerated stress in order to reduce the life of the product or to degrade its performance faster. Gonçalves et al. (2011). The main goal is to develop a basic methodology to provide in advance information to the Thematic Area 3 *Spare parts supply chain* in order to solve the integrated planning problem as can be seen in 2, which illustrates the thematic areas of the project and their interactions.

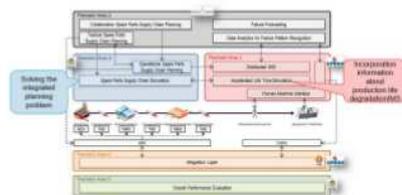


Fig. 2. Thematics Areas to I2MS2C Project

### 2. ACCELERATED LIFE TESTING

With the advent of the internet and tether-free technologies, companies need dramatic changes in transforming traditional *fail and fix* (FAF) maintenance practices to *predict and prevent* (PAP) e-maintenance methodology. Many sophisticated sensors and computerized components are capable of delivering data concerning a machines status and performance. Intelligent prognostic is defined as a systematic approach that can continuously track the health degradation and extrapolate temporal behavior of health indicators so as to predict risks of unacceptable behavior over time, as well as pinpointing exactly which components of a machine are more likely to fail. Lee et al. (2006)

The accelerated life testing of products and materials is used to get quickly information on their life distribution. Such test involves subjecting the testing units to more severe conditions than usual, resulting in lives shorter than those observed under normal conditions. Accelerated testing conditions are typically produced by testing units

at steady high levels of temperature, voltage, pressure, vibration, cycling rate, load etc, or even some combination of such factors. According to Nelson (2004) there are three basic methods suitable for analyzing accelerated life testing data:

- (1) graphical methods;
- (2) maximum likelihood methods; and
- (3) linear estimation methods.

For our purposes, **stress** is used in a general sense, meaning any accelerating variable. The point of such overstress testing is to estimate the life or degradation of the product at the lower stress levels found in normal use, which can be done by statistically fitting an acceleration model to the testing data and extrapolating the fitted model to estimate the products life or degradation found at normal stress levels, as illustrated in (3). When tested under normal use stress levels, such products last so long or degrade so little that their life or performance can not be estimated.

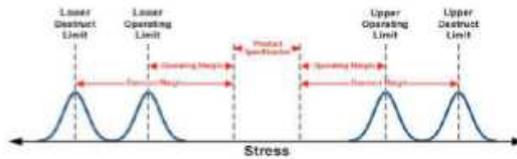


Fig. 3. General product stress specification

### 2.1 Types of accelerations and stress loading

The acceleration testing can be described in terms of high usage rate, overstress, censoring, degradation, and specimen design. We have chosen the *Overstress testing*, which consists of running a product at higher than usual levels of some accelerating stress(es) so as to shorten products life or to degrade its performance faster. Among typical accelerating stresses one can find: temperature, voltage, mechanical load, thermal cycling, humidity, and vibration. Nelson (2004)

The way with the loads are employed in the tests are not limited the amount of stress variables and may have the following characterizations: Constant Stress, Cyclic, Step, Progressive and Random Stress.

### 2.2 Step Stress

In order to degrade the products performance faster it was chosen the step-stress methodology. In this method, the sample is submitted to successively higher levels of stress during a certain time. In the near time occurs the passage of the previously planned higher stress failure, producing the identification of the fault in a faster way. Figure 4 shows the gears that have been used for generating the vibration signals at different conditions, from zero faults to broken teeth. At each step of the levels tested, the vibration increases. During the load stress step, the sample is subjected to successively higher levels of stress.

First, it is subjected to a constant strain over a specific period of time. In this case, the failure is already known

TYPICAL GEARS AND FAILURES FEATURES			
Test Number	Gear	Characteristics	Vibration signal tag
1.		Original standard cylindrical gear manufacturing	NORMAL01A
2.		Cylindrical gear with little wear on teeth	FAILURE315A
3.		Cylindrical gear with excessive wear on teeth	FAILURE420A
4.		Cylindrical gear with broken teeth	FAILURE501A

Fig. 4. Typical gears and failure features

since it refers to a component that was replaced (inserted) in the electric actuator. Therefore, the strain is increased step by step as in a usual testing with the only difference being the fact that the feature of failure is already known. We intend to characterize it by the vibration of signals. Such data may be censored. The main advantage of a step-stress testing is that it rapidly produces faults.

### 2.3 Weibull Distribution

The study of probability and probability distributions allows one to perform functions and a better fit for identifying, analyzing and interpreting data. Some distributions respond better to certain areas, demonstrating better results. Some examples stand out, such as Weibull, exponential, log-normal, normal, generalized gamma, gamma, logistic, log-logistic and Gumbel. The Weibull is the standard model distribution for industrial life data analysis and it was chosen due to the features of the electric actuator. It is an important model especially as far as the reliability and maintainability analyses are concerned. Its methods can be classified into two categories: graphical and analytical methods. Usually, the graphical methods are used due to their simplicity and speed. However, they involve a great probability of error. As a result, the analytical methods are more commonly used. This is motivated by the availability of high-speed computers. Al-Fawzan (2000)

A random variable "X" has Weibull distribution if the probability density function as:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} \exp \left[ -\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \right] & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

Where  $\beta$  is the Weibull shape parameter and  $\eta$ . is the Weibull scale parameter.

The cumulative distribution function is:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right] & \text{if } x \geq 0 \end{cases}$$

Where the Weibull probability distribution parameters  $\eta$ ,  $t_0$  and  $\beta$  mean, respectively:

- $\eta$  - Life feature or scale parameter
- $t_0$  - Minimum life or intrinsic reliability
- $\beta$  - Form factor

$$\begin{cases} \beta < 1 & \text{-Infant mortality} \\ \beta = 1 & \text{-Failures} \\ \beta > 1 & \text{-Failure to wear} \end{cases}$$

### 3. METHODOLOGY

This research was developed as part of the Intelligent Maintenance project being undertaken at UFRGS. We have collected both the torque and vibration signs of our database from an actuator testing bench mounted at Control Systems Laboratory Automation and Robotics (LASCAR). The actuator tested is a CSR-16 model widely used for the Brazilian Petrobras refineries in plants of oil.Company (2001)

Previously, we have mounted the actuator on a supporting metallic bench. Through a cRIO<sup>®</sup> the National<sup>®</sup> logic controller a data logger has stored in the laboratory the information that was used later.

In accelerated testing, the components are submitted to more severe conditions in relation to their usage patterns; they can be carried out in single components or even complex products. They serve both to anticipate the failure mode and improve product reliability. Nelson (2004)

Due to the great need of computational information processing we have chosen the ReliaSoft's ALTA<sup>®</sup> software for implementing graphics and tables.

#### 3.1 The description of working steps

The following flowchart Fig. (5) shows the main stages of the study:

In the first step, we have prepared the parts by inserting faults in the gears that compose the mechanic system of the actuator, which is responsible for opening it and closing it.

In the second step, we have collected information from the actuator through accelerometers and load cells. We have developed a data logger by using the graphical environment LabView<sup>™</sup> and the National<sup>®</sup> Controller.

In the third step, one must collect signals from an equipment running at minimum load as specified by the manufacturer, with all parts in good working order, considering that it is a new equipment. Such signal works as a mean of referral behavior when nothing else affects the actuator, pointing out all the parts without defects.

In the fourth step, a part has been replaced and tested with different loads. We have repeated this process several

Accelerated life test in order to anticipate the detection of faults in electric actuators

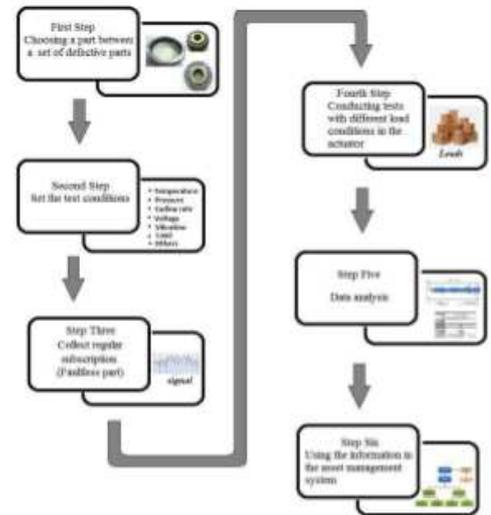


Fig. 5. Flowchart Methodology

times. Throughout all these tests, we have stored the signs and formed the database available in the laboratory

The dimensions of the collected vibration signals are between 150 and 160 thousands of data, representing few seconds of operation. They were thereby collected to prevent the creation of failures that were not known during the operation of the actuator or even to avoid any changes in the features of existing failures. A greater destructive effect could cripple the continuation of the tests. These first four modules feature a flowchart employee, experimental design in order to collect appropriate data that can be analyzed by statistical methods, resulting in valid and objective conclusions. The number of test specimens also must be decided; however, it is often defined according to the number of available specimens. This number is often limited in development programs and it may also be restricted according to fabrication and testing costs. Ideally, the sample size is chosen for yielding estimates in the desired accuracy. Of course, larger samples yield greater accuracy. Nelson (2004)

The fifth step of the flowchart is where the results obtained through the Weibull++<sup>™</sup> and the ReliaSofts ALTAT<sup>™</sup> software are identified, grouped, compared and analyzed properly.

In the sixth and final module of the flow diagram such information is expected to be placed to be used as asset management, enabling a tool for development, production, displacement and storage of parts according to their real future needs.

#### 3.2 Grouping the signals through software

The signals were grouped for testing purposes. In the normal group, the initial sign of 160,000 samples had been split up first into a smaller sign of 20,000 data (NORMAL01A-I), then in a second sample also of 20,000

data (NORMAL01A-M) and finally in a last sample of 10,000 data (NORMAL01A-F). The samples were collected by this method because it is considered that a vibration phenomenon tends to increase its transmission power by passing to other parts of the gear system.

The signal (FAILURE501A) was split up into a sign of 50,000 sampling data and another sign of 20,000 sampling data. The signal (FAILURE420A) was taken by 40,000 and 15,000 sampling data. Finally, a sample of 15,000 data had been collected in (FAILURE315A). After that, the Weibull distribution folders were set up for the analysis of life times.

#### 4. RESULTS

This section presents the results of the simulations. A considerable amount of information was obtained as indicated in the table below; therefore, only the most relevant results shall be presented.

Item	Vibration Signal Tag	Charts	Tables
1.	NORMAL01A	32	4
2.	FAILURE315A	7	1
3.	FAILURE420A	18	5
4.	FAILURE501A	25	3
5.	Signals (1 and 2)	36	5
6.	Signals (1,2 and 3)	17	3
7.	Signals (1,2,3 and 4)	24	2
<b>Total:</b>		<b>159</b>	<b>23</b>

Fig. 6. Table of Results

The software allows a comparison of several existing statistical probabilities, enabling one to examine the suitability of the Weibull distribution in this kind of analysis. As far as the Weibull distribution is concerned, it is known that for

$$\chi \geq \theta$$

$$f(\chi, \kappa, \lambda, \theta) = 0$$

where:

$$\begin{cases} \kappa > 0 & \text{- is the shape parameter,} \\ \lambda > 0 & \text{- is the scale parameter and} \\ \theta & \text{- is the distribution of the locale parameter.} \end{cases}$$

$\theta = 0$  shows a case of Weibull distribution with only two parameters to define. In a general context,  $\theta$  is the source of the distribution. In many contexts, the time of origin has no use unless the graph indicates the beginning so that  $\theta$  is equal to zero, leaving the omitted distribution with two parameters only.

Since the Weibull was calculated by using two parameters, it is therefore known as Weibull 2P.

##### 4.1 Original Standard Cylindrical Gear - NORMAL01A

The wear failure mode is featured by  $\beta > 1$  but there may be situations in which the wear failure occurs after a finite time free of faults, then a value of  $\beta = 1$  is obtained.

The Weibull distribution parameters of wear failure modes can be deduced once their imperfect items are disposed and their data is separately analyzed.

From the analyzed samples of all parameters we obtained  $\beta > 1$ , indicating that the wear faults occur after a finite time free of faults. Beta parameters ( $\beta$ ) were obtained from smaller sampling data between 10,000 and 20,000 samples, indicating that even smaller signals can be used as reference to calculate such parameters.

Of course, the largest sample signal with 60,000 samples showed the best results, but it indicates the signal equipment in good working order; as for samples partly with faults, the adopted signals were smaller.

Samples (b) and (c), as shown in 7, exhibit  $\beta = 1.61897$  and  $\beta = 1.618599$ , respectively. Meaning they were able to obtain a reliable  $\beta$  for a smaller number of samples.

Fig. 7. Main Parameters of Weibull Distribution.eps

The possibility of using the software enables analyzes that require a lot of information processing, such as the parameters of maximum likelihood (MLE), the default sort method (SRM) for middle ranks (MED) and the limit of trust through Fisher Matrix (FM). For the verified data analysis, it is observed that the reliability of such methods can be checked with smaller samples. 8 shows that even different size samples with withdrawal at different times of the signal, namely, the beginning, the middle or the end, keep reliable features. By observing the Weibull function, we realized that it is possible to recognize the stressed signal through less information. This involves reducing sampling time and lowering costs.

##### 4.2 Cylindrical Gear with little tooth wear - FAILURE315A

For this failure, the parameters  $\beta = 1.61844$  and  $\eta = (CIC) = 146,863.304788$  were calculated from 15,000 samples. At this point, by considering it alone, such signal has no significance for the statistical analysis since it has the features of an isolated cyclic signal with mid-range amplitude, where the stress appears on the ordinate axis (y axis) and the time appears on the horizontal axis (x axis). For research purposes, it is known that this signal is derived from a defective part and should then be compared to a part in good condition.

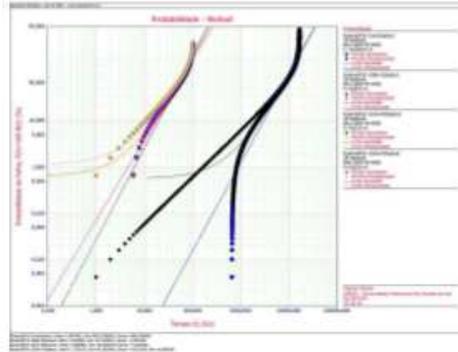


Fig. 8. Weibull probability

4.3 Cylindrical Gear with excessive tooth wear - FAILURE420A

Reliability is the best quantitative measure of the integrity of a designed part, component, product or system. It is the probability that parts, components, products, or systems will perform their designed functions, without failures, in specific environments for a desired period at a given confidence level. Kececioglu (2002)

Hitherto, all data presents a relative amount of adequate information to perform analysis and future interpretation by using a predictive model, such as autoregressive (AR) and moving average (MA). In this case, however, the proposal is to reduce the number of samples and maintain the same possibilities of interpretation. The data analysis aims to check that these confiability methods can be verified by using small samples. 9 shows B90% thus indicating an average life confiability of 90%, which represents 0.9 of reliability. In this example, for a sign of 15,000 sampling data an average of 13,855.930426 life cycles will certainly be reached. A minimum of 13,759.242292 life cycle at least. The confidence limits were provided by the left side.

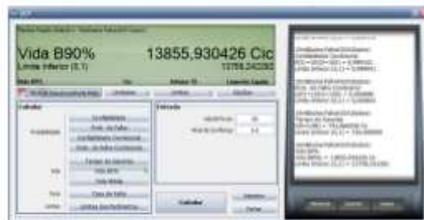


Fig. 9. BX90% Life

4.4 Cylindrical Gear with broken teeth - FAILURE501A

This failure refers to a broken gear with a larger load. Two different confidence levels were tested.

These individualized graphs that were once important to identify the Weibull parameters and analyze the acceleration of life, are now relevant to make comparisons concerning the obtained information.

4.5 Comparisons concerning the analyzed signals

To learn how an earlier sign behave outside, it is necessary to calculate an acceleration factor between the lower

level and the higher level of vibration so as to identify what would be the next failure in accordance with the identification of the new vibration model. For example, a certain vibration is featured by the value 0.058332 and the next stress is recognized by the value 0.065978, which is also a sign and therefore a known failure.

The Weibull probability plots as shown in 10 allow us to work with different confidence intervals; one can observe how the probability of failure  $F(t) = 100 - R(t)(\%)$  behaves as a function of time. This variation could be used differently according to the distance between the manufacturer of the replaced part and the end customer. At issue here is the failure time identification in complete logistic systems, by considering the production, transportation and replacement time, therefore, the entire logistics.

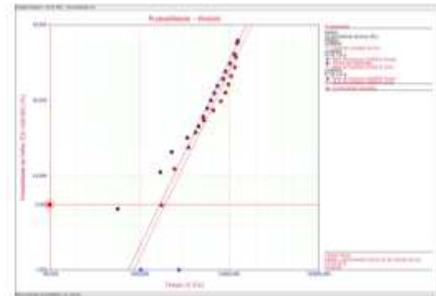


Fig. 10. Weibull Probability

In the graph of 11 where the distribution is presented one can noticed that the line of the graphs of probability functions has different parameters for independent events, therefore defining the Weibull parameters. Also, by using advanced acceleration methods it is possible to estimate a projected life span as the vertical column (y axis) according to a specific stress level, which, in this case, it is the vibration (x axis).

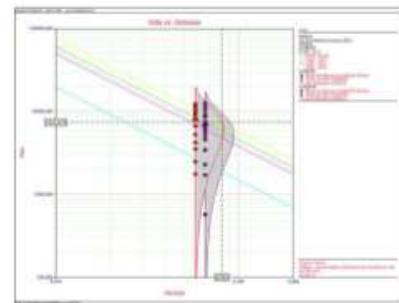


Fig. 11. Life versus Stress - 2 signals

In the graph of Fig.: 12, which shows the *Time of Life vs. Stress*, it is observed that the lines  $\eta$  of the graphs of probability functions has different parameters for independent events, therefore defining the Weibull parameters. Also, by using advanced acceleration methods it is possible to estimate a projected life span as vertical column (y axis) according to a specific level of stress, which, in this case, it is the vibration (x axis). Fig. 13 shows the *Probability Density Functions PDF* where  $f(t)$  is a function of time and sets Fig. 12, which is representing the analyzed failures.

Such information can be grouped and presented according to the table of parameters.

Table 1 could also be displayed graphically, such as the graph in Fig. 14, which is more interesting since it enables to identify where the identified parameters are located and what is their spatial distance.

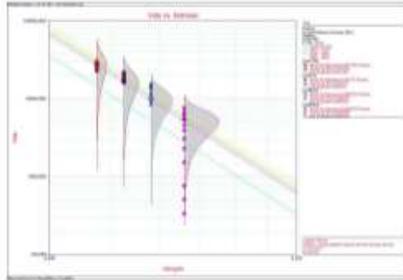


Fig. 12. Life versus Stress - Typical gears

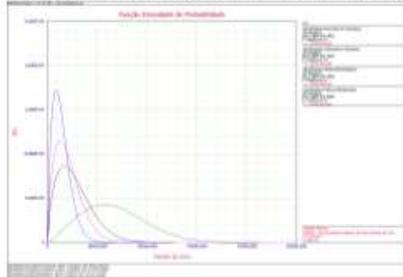


Fig. 13. Probability Density Functions PDF

Table 1. Table of Parameters

Signal	$\beta$	$\eta$	$\eta$ point
NORMAL01A	1.618977	5,518.353363	0.047704
FAILURE315A	1.6184440	8,277.091778	0.05273
FAILURE420A	2.218832	27,114.122262	0.058332
FAILURE501A	1.618599	1.618599	0.065978

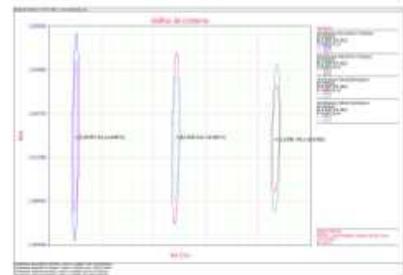


Fig. 14. Contour Graphical  $\eta$  and  $\beta$  function

The tables shown in Figs. 15, 16, 17 and 18 represent the acceleration factors that were used to obtain the results. In Fig.18 the element represents the value (1) since it is the reference signal (healthy) which the other shortcomings were compared to. It is suggested that a problem concerning a typical characteristic stress is expected earlier than others. Hence, it is necessary first to investigate a gear with a single broken tooth only, before studying a gear

with more broken teeth. This form of analysis is considered for case studies only since it is known that there would be no control over the physical phenomenon in the real world.

## Accelerator Factors - AF



Fig. 15. AF of 5.3273384



Fig. 16. AF of 3.155409



Fig. 17. AF of 1.880388



Fig. 18. AF of 1

## 5. CONCLUSION

The relevance of this paper relies on the fact that it suggests a way for performing field research by the means of few resources, such as parts available for testing, as well as good techniques and information for further studies. The flowchart presented indicates a methodology that can be repeated by further projects and experiences. Due to the huge amount of information obtained from it, this method can and should be tested several times in order to exhaust all possibilities, since we are dealing with the reliability and acceleration life of very complex equipment.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We thank UFRGS, FINEP and CAPES BRAGECRIM Project for allowing the development of research projects so as to provide the scientific, economic and social development of the countries involved. We also thank the doctor professors Carlos Eduardo Pereira and Renato Ventura Bayan Henriques as they are responsible for the integration between the entities and the students.

## REFERENCES

- Al-Fawzan, M.A. (2000). Methods for estimating the parameters of the weibull distribution.
- Company, C.A. (2001). *Actuator Manual*.
- Gonçalves, L.F., Bosa, J.L., Balen, T.R., Lubaszewski, M.S., Schneider, E.L., and Henriques, R.V. (2011). Fault detection, diagnosis and prediction in electrical valves using self-organizing maps. *Journal of Electronic Testing*, 27(4), 551–564.
- Kececioglu, D. (2002). *Reliability engineering handbook*, volume 1. DEStech Publications, Inc.
- Kiritzis, D. (2009). Product lifecycle management and embedded information devices. In *Springer Handbook of Automation*, 749–765. Springer.
- Lee, J., Ni, J., Djurdjanovic, D., Qiu, H., and Liao, H. (2006). Intelligent prognostics tools and emaintenance. *Computers in Industry*, 1, 100–102.
- Nelson, W. (2004). *Accelerated Testing-Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*, volume 1. A John Wiley & Sons, Inc.

## ANEXO A DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO ATUADOR

Ao longo deste capítulo serão apresentados em mais detalhes o desenvolvimento do modelo de máquina assíncrona, válvula e tubulação, e sistema de engrenagens do atuador elétrico, que é o estudo de caso considerado neste trabalho.

### 3.2.2 Modelo da Máquina Assíncrona

A máquina assíncrona, ou simplesmente motor de indução, é o tipo de motor de Corrente Alternada (CA) mais comum de todos os motores. Possui uma construção simples e resistente e apresenta boas características de funcionamento. O tipo mais importante de motor de indução polifásico é o motor trifásico.

Na modelagem da máquina assíncrona, inicialmente, obtém-se as equações de tensão e fluxo de rotor e do estator tendo em mente as referências formadas pelos eixos magnéticos das fases do estator e do rotor.

Usualmente denomina-se o conjunto de eixos a, b e c do estator e do rotor de sistemas de coordenadas abc e ao modelo obtido nesse sistema de uma da máquina síncrona no sistema de coordenadas abc ou simplesmente modelo abc, Fig. 11.

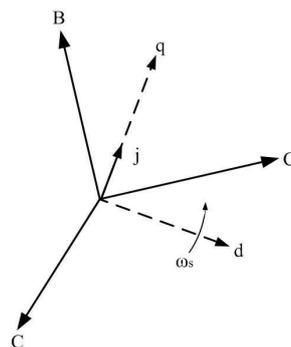


Figura 11: Sistema de coordenadas.

Após, é realizada uma mudança de variáveis nas equações do estator e rotor para um outro sistema de coordenadas formado pelos eixos direto (d) e em quadratura (q), ou sistema dq0, obtendo-se assim as equações do modelo dq0 do motor assíncrono. Destas equações, adquire-se distintos modelos, que se diferenciam a partir da consideração ou não de determinadas constantes de tempo, reatâncias e tensões específicas para cada período de tempo.

### 3.2.2.1 Considerações para a Máquina Assíncrona

No desenvolvimento das equações da máquina assíncrona é usual considerar-se hipóteses simplificadoras. A partir destas considerações desenvolve-se as equações de tensão e fluxo de estator e do rotor e faz-se o levantamento das equações mecânicas e elétricas.

Dentre as considerações típicas da análise de máquinas assíncronas, destaca-se:

- O circuito magnético é linear;
- As perdas magnéticas e mecânicas são desprezadas;
- O fluxo de potência elétrica está entrando na máquina assíncrona;
- O campo magnético no entreferro do motor é distribuído senoidalmente;
- Há uma simetria elétrica e espacial entre as fases dos enrolamentos do estator e rotor.

### 3.2.2.2 Equações Mecânicas da Máquina Assíncrona

Semelhante à máquina de Corrente Contínua (CC), a máquina assíncrona é composta de duas partes principais: um estator (parte estacionária) e um rotor (parte rotativa).

Quando o enrolamento do estator é energizado através de uma alimentação trifásica, cria-se um campo magnético rotativo.

À medida que o campo varre os condutores do rotor, é induzida uma *fem* nesses condutores ocasionando o aparecimento de um fluxo de corrente nos condutores. Os condutores do rotor transportando corrente no campo do estator possuem um torque exercido sobre eles que fazem o rotor girar.

Assim, na máquina assíncrona de rotor em gaiola a corrente de estator cria um campo eletromagnético girante com velocidade síncrona  $\omega_s$  que induz as correntes nos circuitos do rotor. A velocidade síncrona do campo girante induzido pelas correntes de estator se relaciona com a frequência da tensão elétrica aplicada ao estator através da seguinte equação:

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (1)$$

onde:  $f_s$  é a frequência elétrica das tensões de estator da máquina em Hz. O eixo do rotor da máquina assíncrona gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona (no caso do motor, inferior). A essa diferença de velocidade entre o eixo do rotor da máquina e o fluxo magnético gerado pelas tensões de estator se dá o nome de escorregamento definido por:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2)$$

onde:  $\omega_r$  é a velocidade de rotação do eixo do rotor em rad/s e  $\omega_s$  a frequência do campo magnético em rad/s. O escorregamento ( $s$ ) é uma medida adimensional.

Para operação como gerador a velocidade de rotação do eixo do rotor deve ser superior à velocidade de rotação síncrona do campo eletromagnético, ou seja, a máquina assíncrona de rotor em gaiola opera como gerador com escorregamento negativo.

Quanto maior o torque mecânico aplicado ao eixo do rotor, maior a velocidade de rotação do mesmo e, conseqüentemente, maior o módulo do escorregamento. A partir

da equação que relaciona os torques que estão agindo no gerador obtém-se a seguinte expressão:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H_g}(T_e - T_m) \quad (3)$$

onde o torque elétrico ( $T_e$ ) é obtido por:

$$T_e = X_m \Im(\vec{i}_s^* \vec{i}_r) \quad (4)$$

onde:  $X_m$  é a reatância de magnetização da máquina assíncrona, e  $H_g$  é a constante de inércia.

### 3.2.2.3 Equações Elétricas da Máquina Assíncrona

As tensões nos terminais do estator ( $\vec{v}_s$ ) e do rotor ( $\vec{v}_r$ ) podem ser expressas em função das correntes ( $\vec{i}$ ) e fluxos magnéticos ( $\psi$ ) da máquina como variáveis complexas no sistema por unidade (pu) da seguinte maneira:

$$\vec{v}_s = -R_s \vec{i}_s - j\omega_s \psi_s + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_s \quad (5a)$$

$$\vec{v}_r = -R_r \vec{i}_r - j(\omega_s - \omega_r) \psi_r + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_r \quad (5b)$$

e os fluxos concatenados dados por:

$$\psi_s = X_s \vec{i}_s + X_m \vec{i}_r \quad (6a)$$

$$\psi_r = X_m \vec{i}_s + X_r \vec{i}_r \quad (6b)$$

onde:  $X_r$  e  $X_s$  são, respectivamente, as reatâncias do rotor e estator.

### 3.2.2.4 Modelo de Quinta Ordem da Máquina Assíncrona

As variáveis complexas, vistas na Eq. (5) e (6), são então referenciadas no novo sistema de coordenadas ortogonais dado pelos eixos direto (d) e em quadratura (q), fixo no referencial síncrono como visto na Fig. 11. Deste modo, obtém-se as seguintes equações:

$$\vec{v}_s = \vec{v}_{ds} + j \vec{v}_{qs} \quad (7a)$$

$$\vec{v}_r = \vec{v}_{dr} + j \vec{v}_{qr} \quad (7b)$$

$$\vec{i}_s = \vec{i}_{ds} + j \vec{i}_{qs} \quad (7c)$$

$$\vec{i}_r = \vec{i}_{dr} + j \vec{i}_{qr} \quad (7d)$$

$$\psi_s = \psi_{ds} + j \psi_{qs} \quad (7e)$$

$$\psi_r = \psi_{dr} + j \psi_{qr} \quad (7f)$$

Substituindo as Eq. (7) nas Eq.(3), (4), e (5) obtém-se o modelo clássico de quinta

(5<sup>a</sup>) ordem da máquina assíncrona formado pelas seguintes equações:

$$\vec{v}_{ds} = -R_s \vec{i}_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{ds} \quad (8a)$$

$$\vec{v}_{qs} = -R_s \vec{i}_{qs} - \omega_s \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qs} \quad (8b)$$

$$\vec{v}_{dr} = -R_r \vec{i}_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{dr} \quad (8c)$$

$$\vec{v}_{qr} = -R_r \vec{i}_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qr} \quad (8d)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H_g} (T_e - T_m) \quad (8e)$$

$$T_e = X_m (\vec{i}_{ds} \vec{i}_{qr} - \vec{i}_{qs} \vec{i}_{dr}) \quad (8f)$$

e:

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s & 0 & X_m & 0 \\ 0 & X_s & 0 & X_m \\ X_m & 0 & X_r & 0 \\ 0 & X_m & 0 & X_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{i}_{ds} \\ \vec{i}_{qs} \\ \vec{i}_{dr} \\ \vec{i}_{qr} \end{bmatrix} \quad (9a)$$

O modelo da máquina assíncrona pode ser representado por variáveis de estado em termos da velocidade de rotação, das correntes, ou dos fluxos magnéticos, sendo que ao se utilizar as correntes como variáveis de estado ocorre um aumento considerável da complexidade do modelo dinâmico.

### 3.2.2.5 Modelo de Terceira Ordem da Máquina Assíncrona

Uma redução da ordem do modelo dinâmico formado pelas Eq. (8) e (9) pode ser realizada omitindo-se os transitórios do estator, isto é:  $\psi_{ds} = 0$  e  $\psi_{qs} = 0$ .

Além disso, para se obter esta representação simplificada da máquina assíncrona são definidas as seguintes tensões internas como novas variáveis de estado:

$$\dot{V}_d = \omega_s \frac{X_m}{X_r} \psi_{qr} \quad (10a)$$

$$\dot{V}_q = -\omega_s \frac{X_m}{X_r} \psi_{dr} \quad (10b)$$

Desconsiderando-se a dinâmica do estator, a respectiva frequência elétrica  $\omega_s$  pode ser considerada constante e igual a frequência fundamental da rede em pu:

$$\omega_s = 1 \quad (11)$$

Assim, o escorregamento fica definido como:

$$s = 1 - \omega_r \quad (12)$$

Esta simplificação não compromete a precisão dos resultados e diminui a necessidade dos recursos computacionais para as simulações numéricas

Logo, considerando as simplificações realizadas para os fluxos e frequência do estator, substituindo as Eq. (10) e (12) em (8) e (9), e rearranjando, obtém-se o modelo de 3ª ordem da máquina assíncrona:

$$\dot{s} = \frac{1}{2H_g}(T_e - T_m) \quad (13a)$$

$$\dot{V}'_d = \frac{-1}{T_0} [V'_d - I_{qs}(X_s - X'_s)] + s\omega_s V'_q \quad (13b)$$

$$\dot{V}'_q = \frac{-1}{T_0} [V'_q + I_{ds}(X_s - X'_s)] - s\omega_s V'_d \quad (13c)$$

$$V_{ds} = V'_d - R_s I_{ds} + X'_s I_{qs} \quad (14a)$$

$$V_{qs} = V'_q - R_s I_{qs} - X'_s I_{ds} \quad (14b)$$

$$T_e = V'_d I_{ds} + V'_q I_{qs} \quad (14c)$$

onde:

$$L_{ss} = L_s + L_m \quad (15a)$$

$$T_0 = L_{rr}/(\omega_s R_r) \quad (15b)$$

$$X'_s = L_{ss} - L_m^2/L_{rr} \quad (15c)$$

onde:  $L_r$  é a indutância do rotor, com  $L_{rr} = L_r + L_m$ ;  $L_s$  a indutância do estator ( $L_{ss} = L_s + L_m$ ), e  $L_m$  a indutância de magnetização

## ANEXO B    MODELAGEM DA VÁLVULA E TUBULAÇÃO

### B.1    Válvula e Tubulação

As equações do modelo da válvula levam em conta as equações de dimensionamento da válvula e do balanço de forças que existe dentro do trecho da tubulação.

A relação que expressa a vazão de um fluido pelo área ocupada pelo obturador da válvula e fatores geométricos do corpo da válvula é da pela seguinte equação:

$$V_f = \frac{a}{100} N_m F_p F_y N_R C_v \sqrt{\Delta P \rho} \quad (31)$$

onde:  $V_f$  é a vazão do fluido,  $a$  é a abertura da válvula,  $N_m$  é uma constante numérica que depende das unidades de medida,  $F_p$  é o fator de geométrica da tubulação adjacente,  $F_y$  é o fator de correção devido ao fluxo crítico (expressa a relação entre a pressão diferencial máxima e efetiva na produção de vazão),  $N_R$  é o número de Reynolds (usado para caracterizar o tipo de fluxo: laminar ou turbulento),  $C_v$  é o coeficiente de vazão, e  $\Delta P$  é a diferença de pressão do fluido entre os dois lados do obturador

A Eq. B.1 pode ser escrita do seguinte modo:

$$V_f = N_R f(a) C_v \sqrt{\Delta P \rho} \quad (32)$$

com:

$$f(a) = \frac{a}{100} N_m F_p F_y \quad (33)$$

onde:  $f(a)$  expressa a característica de vazão inerente da válvula. Esta característica de vazão está relacionada a geometria da válvula; i.e. ao tipo de válvula, que pode ser gaveta, borboleta, ou globo por exemplo. Dependendo do tipo de válvula, distintos tipos de características pode ser obtidas:

$$f(a) = a \quad (34a)$$

$$f(a) = R^{a-1} \quad (34b)$$

$$f(a) = \frac{a}{\sqrt{3 - 2a^2}} \quad (34c)$$

linear, exponencial, ou parabólica, respectivamente; assim como distintas equações de vazão.

Após, é realizada uma mudança de variáveis nas equações do estator e rotor para um outro sistema de coordenadas formado pelos eixos direto (d) e em quadratura (q), ou sistema dq0, obtendo-se assim as equações do modelo dq0 do motor assíncrono. Destas equações, adquire-se distintos modelos, que se diferenciam a partir da consideração ou

não de determinadas constantes de tempo, reatâncias e tensões específicas para cada período de tempo.

### 3.2.2.1 Considerações para a Máquina Assíncrona

No desenvolvimento das equações da máquina assíncrona é usual considerar-se hipóteses simplificadoras. A partir destas considerações desenvolve-se as equações de tensão e fluxo de estator e do rotor e faz-se o levantamento das equações mecânicas e elétricas.

Dentre as considerações típicas da análise de máquinas assíncronas, destaca-se:

- O circuito magnético é linear;
- As perdas magnéticas e mecânicas são desprezadas;
- O fluxo de potência elétrica está entrando na máquina assíncrona;
- O campo magnético no entreferro do motor é distribuído senoidalmente;
- Há uma simetria elétrica e espacial entre as fases dos enrolamentos do estator e rotor.

### 3.2.2.2 Equações Mecânicas da Máquina Assíncrona

Semelhante à máquina de Corrente Contínua (CC), a máquina assíncrona é composta de duas partes principais: um estator (parte estacionária) e um rotor (parte rotativa).

Quando o enrolamento do estator é energizado através de uma alimentação trifásica, cria-se um campo magnético rotativo.

À medida que o campo varre os condutores do rotor, é induzida uma *fem* nesses condutores ocasionando o aparecimento de um fluxo de corrente nos condutores. Os condutores do rotor transportando corrente no campo do estator possuem um torque exercido sobre eles que fazem o rotor girar.

Assim, na máquina assíncrona de rotor em gaiola a corrente de estator cria um campo eletromagnético girante com velocidade síncrona  $\omega_s$  que induz as correntes nos circuitos do rotor. A velocidade síncrona do campo girante induzido pelas correntes de estator se relaciona com a frequência da tensão elétrica aplicada ao estator através da seguinte equação:

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (35a)$$

onde:  $f_s$  é a frequência elétrica das tensões de estator da máquina em Hz.

A característica de vazão escolhida neste trabalho foi <sup>1</sup>:

$$f(a) = \begin{cases} 100 - a & : \text{ para fechamento} \\ a & : \text{ para abertura} \end{cases} \quad (35b)$$

Substituindo a Eq.(35) em (31) e isolando  $\Delta P$  obtém-se:

$$\Delta P = \frac{V_f^2}{\rho N_R^2 (100 - a)^2 C_v^2} \quad (36)$$

A força exercida pelo fluido e um certa área de seção transversal ( $A_v$ ) é dada por:

$$F_f = \Delta P A_v \quad (37)$$

---

<sup>1</sup>Foi simulada somente a situação de fechamento.

Substituindo a Eq. (36) em (37) obtém-se:

$$F_f = \frac{V_f^2 A_v}{\rho N_R^2 (100 - a^2) C_v^2} \quad (38)$$

Realizando o balanço dinâmico de forças temos

$$F_h - \Delta P_f A_v - F_a - F_m = M_h \frac{da^2}{dt^2} \quad (39)$$

Substituindo (37) em (39) e reescrevendo a equação obtém-se a equação da aceleração da haste,  $a_a$ :

$$a_a = \frac{1}{M_h} (F_h - F_f - F_a - F_m) \quad (40)$$

onde:  $M_h$  é a massa do conjunto haste e obturador; e a força da haste ( $F_h$ ), força de atrito ( $F_a$ ), e força da mola ( $F_m$ ) são dadas por:

$$F_h = \frac{T_h}{R_h \cos(\theta)} \quad (41a)$$

$$F_a = C_a v_a \quad (41b)$$

$$F_m = K_m a \quad (41c)$$

onde:  $C_a$  é a constante de atrito,  $K_m$  é o coeficiente de hook da mola,  $T_h$  é o torque do atuador exercido na haste,  $R_h$  é distância entre o acoplamento do atuador e o obturador da válvula,  $\theta$  é o ângulo existente entre a força do atuador e a haste.

### 3.2.2.6 Estratégia de Controle da Máquina Assíncrona

A estratégia de controle adotada é a do tipo liga / desliga, isto é:

$$V_{ds} = \begin{cases} 0 & : T_h \geq 110\% \text{ ou } a \geq a_{ref} \\ 1 & : 0 \leq T_h < 110\% \text{ e } 0 \leq a < a_{ref} \end{cases} \quad (16)$$

Assim, o motor irá parar de funcionar caso o valor de torque alcance o sobretorque máximo admissível (110%) ou obturador da válvula alcance a posição de referência ( $a_{ref}$ ).

### 3.2.3 Modelo do Conjunto de Engrenagens

As engrenagens são elementos mecânicos formadas, geralmente, por um par de rodas dentadas que se ligam a um eixo rotativo, ao qual imprimem movimento. A função básica de uma engrenagem é transmitir velocidade e torque. As engrenagens apresentam tamanhos e formatos variados, alterando assim o tipo de transmissão de movimento. Deste modo, pode-se classificar as engrenagens de acordo com os seguintes tipos:

1. engrenagens cilíndricas retas;
2. engrenagem coroa e parafuso sem-fim;
3. engrenagens cilíndricas helicoidais;
4. engrenagens cilíndricas cônicas.

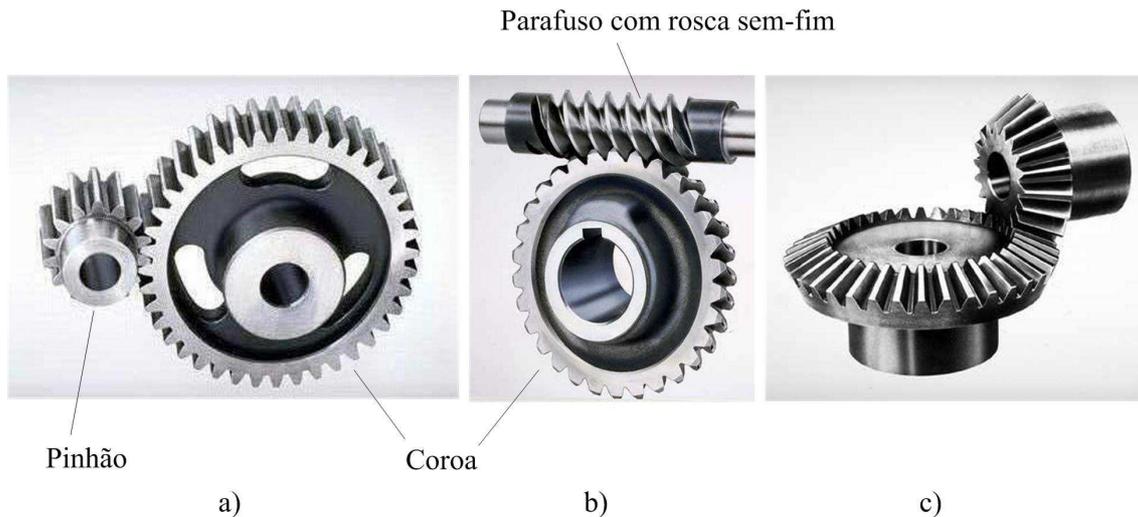


Figura 52: \*  
Engrenagens de: a) dentes retos b) coroa e sem-fim c) cônicas.

O sistema de engrenagens foi modelado levando em conta estes tipos de acoplamentos existentes entre os três sistemas de engrenagens do atuador.

### 3.2.3.1 Primeiro Sistema de Redução Cinemática

O primeiro sistema de redução cinemática é formado por um par de engrenagens retas. Estas, são chamadas assim devido ao fato de possuírem um par de engrenagens cilíndricas de dentes retos. São normalmente empregadas para transmitir o movimento entre eixos paralelos, como visto na Fig.12 a).

A relação de transmissão de velocidade ( $\omega$ ) e torque ( $T$ ) entre o primeiro par de engrenagens (primeiro sistema de redução cinemática, ou redução primária) é dada por:

$$K_1 = \frac{\omega_r}{\omega_1} = \frac{T_1}{T_m} \quad (17)$$

onde:  $\omega_r$  é velocidade de giro do eixo do rotor,  $\omega_1$  é velocidade de giro do parafuso com rosca sem-fim,  $T_m$  é o torque mecânico transmitido pelo motor,  $T_1$  é o torque transmitido ao parafuso com rosca sem-fim.

Assim, o torque  $T_1$  (em pu) pode ser escrito como:

$$T_1 = T_m K_1 \quad (18)$$

e:

$$T_1 = -T_m T_{mb} K_1 \quad (19)$$

em Nm, onde  $T_{mb}$  é o torque mecânico de base.

A relação entre força ( $F$ ) e torque aplicado em um eixo é dada por:

$$T = \vec{d} \times \vec{F} = d F \text{sen}(\theta) \quad (20)$$

onde:  $d$  é a distância entre o eixo de rotação e ponto de aplicação da força e  $\theta$  é o ângulo entre o braço do torque e a força.

Assim, pode-se obter a expressão da força aplicada no sem-fim:

$$F_1 = \frac{T_1}{d_1 \text{sen}(\theta)} = \frac{-T_m T_{mb} K_1}{d_1 \text{sen}(\theta)} \quad (21)$$

onde:  $\theta \cong 90^\circ$ .

### 3.2.3.2 Segundo Sistema de Redução Cinemática

O segundo sistema de redução cinemática é formado por um parafuso com rosca sem-fim e uma engrenagem do tipo coroa, Fig.12 b).

A relação de transmissão de velocidade e para o segundo par de engrenagens é dada por:

$$K_2 = \frac{\omega_1}{v_2} = \frac{2\pi}{P_s} = \frac{F_2}{T_1} \quad (22)$$

onde:  $v_2$  é velocidade tangencial da coroa, e  $P_s$  é o passo do sem-fim.

Assim, a relação entre o torque do sem-fim ( $T_1$ ) e a força aplicada na coroa ( $F_2$ ) é:

$$F_2 = T_1 K_2 \quad (23)$$

Ainda, o torque sentido pela coroa é:

$$T_2 = F_2 d_2 \text{sen}(\theta_2) \quad (24)$$

onde:  $d_2$  é a distância entre o eixo de rotação da coroa e o ponto de aplicação da força, e  $\theta_2 \cong 90^\circ$ .

### 3.2.3.3 Terceiro Sistema de Redução Cinemática

O terceiro sistema de redução cinemática é formado por um conjunto de engrenagens cilíndricas helicoidais e cônicas, conhecido como sistema diferencial.

Este sistema foi modelado, simplesmente, levando em conta uma relação linear entre os torques  $T_2$  e  $T_h$ , is

to é:

$$T_h = T_2 K_3 \quad (25)$$

onde:  $R_h$  é a distância entre o eixo de rotação do sistema diferencial e o ponto de aplicação da força, com  $\theta_3 \cong 90^\circ$ .

Agora, considerando a Eq.(20), obtém-se a expressão para a força  $F_h$ : substituindo a Eq. (22) em (24) e isolando  $F_3$ ,

$$F_h = \frac{T_2 K_3}{R_h \text{sen}(\theta_3)} \quad (26)$$

Substituindo as Eq.(21), (23), e (19) em (26) adquire-se:

$$F_h = \frac{-T_m T_{mb} K_1 K_2 K_3 d_2}{d_1 R_h \text{sen}(\theta_3)} \quad (27)$$

que fica:

$$F_h = \frac{-T_m K_R T_{mb}}{R_h} = \frac{T_h}{R_h \operatorname{sen}(\theta_3)} \quad (28)$$

com:

$$K_R = \frac{K_1 K_2 K_3 d_2}{d_1 R_h} \quad (29)$$

onde:  $K_R$  é o coeficiente de redução cinemática geral.