LUIS ANTONIO FERRAZ JUNIOR

Procedimento de estimação da confiabilidade dos resultados obtidos em sistemas de medição. Estudo de caso da confiabilidade do equipamento de medição do número de *Swirl*.

São Paulo

2017

LUIS ANTONIO FERRAZ JUNIOR

Procedimento de estimação da confiabilidade dos resultados obtidos em sistemas de medição. Estudo de caso da confiabilidade do equipamento de medição do número de *Swirl*.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Engenharia Automotiva

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Massarani

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 28 de Junho de 2017

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Ferraz Junior, Luis Antonio

Procedimento de estimação da confiabilidade dos resultados obtidos em sistemas de medição. Estudo de caso da confiabilidade do equipamento de medição do número de Swirl / L. A. Ferraz Junior -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

172 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Centro de Engenharia Automotiva.

1.Produto (confiabilidade) 2.Processo de fabricação (engenharia mecânica) 3.Testes acelerados I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Centro de Engenharia Automotiva II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof.Dr. Marcelo Massarani por sua colaboração e companheirismo durante a elaboração deste trabalho.

A empresa onde trabalho pelas horas dedicadas.

As pessoas do laboratório, onde realizei os testes, pela ajuda e compreensão.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha querida e amada esposa, com muito amor, pela sua compreensão, auxílio e paciência durante todo o tempo de desenvolvimento desse trabalho.

Dedico também a minha amada filha Nicolly, que foi gerada durante o projeto de pesquisa, vindo ao mundo na sua conclusão.

“Não procure ser um homem com
êxito, e sim um homem com valores”.
(Albert Einstein)

RESUMO

Os sistemas de medição são projetados para obter uma capacidade de acordo com as exigências do cliente final ou especificações de engenharia. Esta capacidade deve ser mantida através de manutenções preventivas e calibrações. Este estudo apresenta um procedimento, onde se determina a capacidade do sistema de medição utilizando o MSA (*Measurement System Analysis*). Após obter a capacidade do sistema de medição, a sua confiabilidade é estimada, considerando como falha a perda da capacidade obtida. Os tempos de falha são obtidos em testes de vida acelerados utilizando como sobrecarga o aumento da temperatura. Os tempos de falha são extrapolados para condição de uso através dos modelos de Arrhenius-exponencial, Arrhenius-Weibull e Arrhenius-lognormal. O MTTF (tempo médio para falhar) é calculado para estimação dos tempos de manutenção e calibração do sistema de medição. Uma aplicação do procedimento proposto é realizada em um equipamento protótipo de medição do número de *Swirl* desenvolvido com uma nova tecnologia de medição mais rápida e precisa em relação aos existentes no mercado. O estudo avalia a capacidade do equipamento de medição de *Swirl*, e posteriormente, estima tempos de falha para obter a confiabilidade das medições obtidas e o tempo necessário para sua manutenção.

ABSTRACT

The measuring systems are designed to achieve a capability according to the requirements from the end customer or engineering specifications. This capability must be maintained through preventive maintenance and calibration. This study presents a procedure, where the measurement system capability is determined using the MSA (Measurement System Analyzes). After obtaining the capability of the measurement system, its reliability is estimated, considering as failure the loss of the capacity obtained. Failure times are obtained in accelerated life tests using the temperature increase as an overloading. The failures times are extrapolated to use condition through the Arrhenius-exponential, Arrhenius-Weibull and Arrhenius-lognormal models. The MTTF (mean time to failure) is calculated to estimate the maintenance and calibration times for the measurement system. An application of the proposed procedure is carried out on a prototype equipment to measure the Swirl number developed with a new measurement technology faster and more accurate than others available on the market. The study evaluates the capability of equipment to measure the Swirl number and then estimates failure times to obtain the reliability of measurements obtained and the time required for their maintenance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constante para carta de controle	28
Tabela 2 – Comparação FMEA x FTA	59
Tabela 3 – Sensor de distância (técnica 1)	113
Tabela 4 – Sensor de pressão (técnica 1).....	113
Tabela 5 – Sensor de temperatura (técnica 1)	114
Tabela 6 – Rotação bomba de ar (técnica 1)	114
Tabela 7 – Valores das medições MSA - técnica 1	116
Tabela 8 – Índice de Cg e Cgk.....	117
Tabela 9 – Sensor de distância (técnica 3)	119
Tabela 10 – Sensor de pressão (técnica 3).....	119
Tabela 11 – Sensor de temperatura (técnica 3)	120
Tabela 12 – Rotação de bomba de ar (técnica 3)	120
Tabela 13 – Valores das medições MSA - técnica 3.....	122
Tabela 14 – Índice de GRR método das amplitudes	123
Tabela 15 – Índice de GRR método das médias e amplitudes.....	124
Tabela 16 – Índice de GRR método da análise da variância	125
Tabela 17 – Resultado FMEA	130
Tabela 18 – Exemplo dos tempos de falhas a 40°C.....	134
Tabela 19 – Exemplo dos tempos de falhas a 45°C.....	134
Tabela 20 – Exemplo dos tempos de falhas a 50°C.....	134
Tabela 21 – Função de confiabilidade estimada de Kaplan-Meier	135
Tabela 22 – Resíduos para modelo Arrhenius-exponencial.....	140
Tabela 23 – Resíduos para modelo Arrhenius-Weibull	142
Tabela 24 – Resíduos para modelo Arrhenius-lognormal	144

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação exatidão x precisão	31
Figura 2 – Tipo de falhas.....	48
Figura 3 – Métodos de aceleração	86
Figura 4 – Fluxograma geral para aplicação do MSA	102
Figura 5 – Fluxograma geral para aplicação do estudo de confiabilidade.....	104
Figura 6 – Equipamento de medição do número de <i>Swirl</i>	108
Figura 7 – Componentes medidor de <i>Swirl</i>	109
Figura 8 – Fluxograma do estudo para aplicação do MSA.....	111
Figura 9 – Fluxograma do estudo de caso para aplicação do estudo de confiabilidade	127
Figura 10 – Partes equipamento de medição do número de <i>Swirl</i> – corpo	128
Figura 11 – Partes equipamento de medição do número de <i>Swirl</i> - calibração.....	129
Figura 12 – Partes equipamento de medição do número de <i>Swirl</i> – Medidor de torque	129
Figura 13 – Árvore de falhas	131

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Enviesamento	22
Gráfico 2 – Estabilidade	23
Gráfico 3 – Linearidade	23
Gráfico 4 – Repetibilidade	24
Gráfico 5 – Reprodutibilidade	24
Gráfico 6 – Consistência	25
Gráfico 7 – Uniformidade.....	25
Gráfico 8 – Repetibilidade e reprodutibilidade (GRR)	34
Gráfico 9 – Curva da banheira	51
Gráfico 10 – Taxa acumulada de falhas.....	52
Gráfico 11 – Relação parâmetros de confiabilidade.....	53
Gráfico 12 – Estimador da tabela de vida para função de confiabilidade.....	62
Gráfico 13 – Estimador de Kaplan-Meier para a função de confiabilidade.....	63
Gráfico 14 – Demonstrações gráficas da distribuição exponencial	67
Gráfico 15 – Demonstrações gráficas da distribuição de Weibull.....	70
Gráfico 16 – Demonstrações gráficas para distribuição de Weibull	71
Gráfico 17 – Demonstrações gráficas para função lognormal.....	74
Gráfico 18 – Gráfico de probabilidade de Weibull	79
Gráfico 19 – Gráfico de probabilidade normal/lognormal	80
Gráfico 20 – Níveis de estresse	87
Gráfico 21 – Estresse em níveis.....	87
Gráfico 22 – Estresse progressivo	88
Gráfico 23 – Estresse cíclico	88
Gráfico 24 – Histograma da curva distribuição normal do número de <i>Swirl</i> – técnica 1	117
Gráfico 25 – Função da confiabilidade estimada de Kaplan-Meier	136
Gráfico 26 – Linearização da função confiabilidade Kaplan-Meier $\ln(-\ln(K_m)) \times \ln(t)$	137
Gráfico 27 – Quantil da distribuição normal $\times \ln(t)$	137
Gráfico 28 – Verificação adequação do modelo Arrhenius-exponencial	141
Gráfico 29 – Verificação adequação do modelo Arrhenius-Weibull.....	143
Gráfico 30 – Verificação adequação do modelo Arrhenius-lognormal.....	145

LISTA DE SIGLAS

AIAG	Automotive industry action group
ALT	Teste de vida acelerado
ANOVA	Análise da variância
ASTM	American society for testing and materials
GRR	Reprodutibilidade e repetitividade do sistema de medição
HALT	Teste de degradação acelerado
IHM	Interface homem máquina
MSA	Sistema de análise de medição
CEP	Controle estatístico do processo
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

UCL	Limite superior de controle
LCL	Limite inferior de controle
σ_{total}	Desvio padrão da variabilidade total
σ_p	Desvio padrão da variabilidade dos produtos (amostras)
σ_{medidor}	Desvio padrão da variabilidade do medidor
σ_o	Desvio padrão da variabilidade dos operadores
σ_{po}	Desvio padrão da variabilidade da interação entre as amostras e operadores
σ_{erro}	Desvio padrão da variabilidade do erro aleatório
$\sigma_{\text{repetibilidade}}$	Desvio padrão da repetibilidade
$\sigma_{\text{reprodutibilidade}}$	Desvio padrão da reprodutibilidade
$\sigma_{\text{erromedidor}}$	Desvio padrão do erro do medidor
$\bar{R}$	Média das diferenças ente a maior e menor medida em cada amostra.
d_2	Constante da distribuição normal
P/T	Taxa para tolerância
ρ_p	Taxa da variabilidade do processo
ρ_m	Taxa da variabilidade do sistema de medição
SNR	Razão sinal-ruído
DR	Taxa de discriminação
C_{ms}	Capabilidade do sistema de medição
σ	Desvio padrão das medições
C_g	Índice de dispersão
C_{gk}	Índice de centralização
B_i	Diferença entre média e valor de referência
$\bar{X}$	Média dos valores medidos
x	Valor medido
N	Valor de referência
T_{ol}	Intervalo da tolerância especificada
R	Amplitude das medições por amostra
$\bar{R}$	Média das amplitudes
n	Número de amostras
$\bar{\bar{X}}$	Média das médias das medições
$\bar{\bar{R}}$	Média das médias das amplitudes dos operadores

$\overline{X_{diff}}$	Amplitude das médias das medições por operador
r	Número de medições
k	Número de operadores
$\bar{X}_{Max}$	Valor máximo das médias das medições por amostra
$\bar{X}_{Min}$	Valor mínimo das médias das medições por amostra
EV	Variação do equipamento
TV	Variação total
AV	Variação do operador
PV	Variação por amostra
R_p	Amplitude das médias das medições por amostra
K_1	Constante do número de medições
K_2	Constante do número de operadores
K_3	Constante do número de amostras
ndc	Número de categorias distintas
P_i	Parâmetro do efeito das amostras
O_j	Parâmetro do efeito dos operadores
PO_{ij}	Parâmetro do efeito das interações entre amostras e operadores
e_{ijk}	Erro aleatório
$V(P_i)$	Variância do efeito das amostras
$V(O_j)$	Variância do efeito dos operadores
$V((PO)_{ij})$	Variância do efeito das interação entre amostras e operadores
$V(e_{ijk})$	Variância do erro aleatório
$V(y_{ijk})$	Variação de qualquer observação
SQ_{total}	Soma dos quadrados da variância total
$SQ_{amostras}$	Soma dos quadrados da variância das amostras
$SQ_{operadores}$	Soma dos quadrados da variância dos operadores
SQ_{pxo}	Soma dos quadrados da variância da interação entre os operadores e amostras
SQ_{erro}	Soma dos quadrados da variância dos erros aleatórios
$E(MQ_p)$	Valores esperados das amostras
$E(MQ_o)$	Valores esperados dos operadores
$E(MQ_{pxo})$	Valores esperados da interação entre os operadores e amostras
$E(MQ_e)$	Valores esperados dos erros aleatórios
MQ_p	Mínimos quadrados das amostras
MQ_o	Mínimos quadrados dos operadores

MQ_{pxo}	Mínimos quadrados da interação entre os operadores e amostras
MQ_e	Mínimos quadrados dos erros aleatórios
$\widehat{\sigma}_{erro}$	Variância dos erros aleatórios
$\widehat{\sigma}_{pxo}$	Variância da interação amostras e operadores
$\widehat{\sigma}_o$	Variância dos operadores
$\widehat{\sigma}_p$	Variância das amostras
IAP	Interação dos operadores por peça
G	Severidade da falha
F	Probabilidade de ocorrência da falha
D	Probabilidade de detecção da falha
RPN	Número de prioridade de risco
t	Tempo de falha
f(t)	Função de densidade da probabilidade (pdf)
F(t)	Função acumulativa de probabilidade (cdf)
R(t)	Função confiabilidade
h(t)	Função de risco ou taxa de falhas
λ	Taxas de falhas
H(t)	Taxa acumulativa de falha
Var(t)	Variância
MTBF	Tempo médio entre falhas
MTTF	Tempo médio para falhar
E(t)	Tempo esperado
nf	Número de falhas no intervalo
np	Número de produtos em operação
nt	Número de produtos sob teste
$\hat{q}_i$	Estimativa da probabilidade de falha em (t_{i-1}, t_i)
n_i	Número de itens que falharam no intervalo (t_{i-1}, t_i)
n_r	Número de itens sob risco em t_{i-1}
n_c	Número de itens censurado em t_{i-1}
d	Número de falhas no tempo t_i
n_{fc}	Número de itens sob risco não falhou e não foi censurado em t_i (exclusive)
α	Parâmetro de escala da distribuição exponencial e Weibull
δ	Parâmetro de forma da distribuição exponencial
p	Percentil de falha

t_p	Total de falhas esperado no percentil
β	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
$\Gamma(x)$	Função gama
μ	Parâmetro de escala da distribuição lognormal
σ	Parâmetro de forma da distribuição lognormal
$R_{km}(t)$	Função confiabilidade de Kaplan-Meier
t_t	Tempo do teste
t_r	Tempo de falha da última unidade
i	Número da amostra
L	Vida do componente
A	Constante que depende da propriedade do material, critério de falha, desenho do produto e outros fatores
B	Constante que depende da propriedade do material, critério de falha, desenho do produto e outros fatores
E_a	Energia de ativação
T	Temperatura absoluta
$^{\circ}\text{C}$	Graus célsius
A_{fa}	Fator de aceleração de Arrhenius
A_{fpi}	Fator de aceleração de potência inversa
f	Taxa de uso
β_0 e β_1	Parâmetros do modelo de regressão
ε	Erro modelo de regressão
e_{ij}	Resíduos
FDM	Curva da distribuição normal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. CONFIABILIDADE, CAPABILIDADE E TESTE DE VIDA	21
2.1. CAPABILIDADE	21
2.1.1. ANÁLISE DE SISTEMA DE MEDIÇÃO	22
2.1.2. ÍNDICES DA CAPABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (CG E CGK)	31
2.1.3. REPRODUTIBILIDADE E REPETITIVIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO - GRR	33
2.1.3.1. Método das amplitudes	35
2.1.3.2. Método das médias e amplitudes	35
2.1.3.3. Método da análise da variância	39
2.2. CONFIABILIDADE	44
2.3. FMEA.....	56
2.4. FTA.....	58
2.5. ANÁLISE DO TEMPO DE FALHA.....	60
2.5.1. ESTIMAÇÃO DA FUNÇÃO CONFIABILIDADE NA AUSÊNCIA DE CENSURA, ESTIMAÇÃO NÃO-PARAMÉTRICA	60
2.5.2. ESTIMAÇÃO DA FUNÇÃO CONFIABILIDADE NA PRESENÇA DE CENSURA, ESTIMAÇÃO NÃO-PARAMÉTRICA	61
2.5.2.1. Tabela de vida	61
2.5.2.2. Estimador de Kaplan-Meier (Km)	62
2.5.3. MODELOS PROBABILÍSTICOS – ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA	64
2.5.3.1. Distribuição exponencial.....	64
2.5.3.2. Distribuição Weibull	68
2.5.3.3. Distribuição lognormal	72
2.5.3.4. Método para estimativa dos parâmetros dos modelos	75
2.5.3.5. Técnica para escolha do modelo.....	81
2.6. TESTE DE VIDA.....	82
2.6.1. TESTE DE VIDA ACELERADOS.....	84
2.6.1.1. Método de aceleração	85
2.6.1.2. Variáveis de estresse	89
2.6.1.3. Planejamento do teste	91
2.6.1.4. Relação estresse resposta	93
2.6.1.4.1. Modelo de Arrhenius	94
2.6.1.4.2. Modelo de potência inversa.....	95
2.6.1.5. Modelo de regressão.....	96
2.6.1.5.1. Modelo de Arrhenius-Weibull e potência inversa-Weibull.....	97
2.6.1.5.2. Modelo de Arrhenius-lognormal e potência inversa-lognormal.....	98
2.6.1.5.3. Estimativa dos parâmetros do modelo	99
3. PROCEDIMENTO DE ESTIMAÇÃO DA CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS OBTIDOS EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO	101
3.1. PROCEDIMENTO PARA MENSURAR A CAPABILIDADE	101
3.2. PROCEDIMENTO PARA ESTIMATIVA DA CONFIABILIDADE.....	103

4. ESTUDO DE CASO – CONFIABILIDADE DAS MEDIÇÕES OBTIDAS NO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DO NÚMERO DE <i>SWIRL</i>	108
4.1. CÁLCULOS DA CAPABILIDADE.....	110
4.1.1. FLUXOGRAMA	110
4.1.2. RESULTADOS DA TÉCNICA 1	111
4.1.3. RESULTADOS DA TÉCNICA 3	118
4.2. CÁLCULO DA MEDIDA DA CONFIABILIDADE MTTF.....	126
4.2.1. FLUXOGRAMA	126
4.2.2. FMEA E FTA	128
4.2.3. TESTES DE VIDA ACELERADO.....	132
4.2.3.1. Análise dos tempos de falha	135
4.2.3.2. Cálculo da medida de confiabilidade MTTF	145
4.2.3.2.1. Cálculo do MTTF Arrhenius-exponencial	146
4.2.3.2.2. Cálculo do MTTF Arrhenius-Weibull.....	146
4.2.3.2.3. Cálculo do MTTF Arrhenius-lognormal.....	147
4.3. RESULTADOS.....	147
5. DISCUSSÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO	149
6. CONCLUSÃO.....	151
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
8. REFERÊNCIAS.....	154
APÊNDICE A1 – FMEA MEDIDOR DE TORQUE.....	158
ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO SENSOR DE DISTÂNCIA	172

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de medição e controle devem estar de acordo com os requisitos quanto sua capacidade, isto é, obtendo índices de repetibilidade e reprodutibilidade.

Para obtenção destes índices, existem procedimentos padronizados, que avaliam as variações entre as medições obtidas provenientes dos produtos, do equipamento utilizado e os operadores.

Estes índices devem ser mantidos durante a vida útil do equipamento, realizando intervenções de manutenção, sendo de substituição de componentes ou calibração.

As manutenções devem ser realizadas com uma periodicidade definida a fim de não comprometer a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para se determinar a confiabilidade de produtos, são realizados testes de vida obtendo medidas que avaliam a confiabilidade do produto analisado.

Este estudo sugere um procedimento para obtenção de uma medida de confiabilidade das medições obtidas em sistemas de medição, obtendo uma estimativa do tempo de manutenção.

Para avaliar o procedimento proposto, um equipamento de medição do número de *Swirl* foi utilizado. O número de *Swirl* é adimensional e relaciona de forma geral a vazão de ar sob pressão controlada que passa pelas válvulas de admissão com o torque gerado em um retificador de fluxo montado logo após as válvulas de admissão.

O número de *Swirl* ocorre devido aos dois dutos de admissão de ar terem um formato diferenciado. Um duto é retilíneo e o outro duto é curvo, formando uma turbulência na câmara de combustão.

O controle do número de *Swirl* é importante, pois suas variações podem aumentar a emissão de poluentes ou o consumo de combustível. A emissão de poluentes e o consumo de combustível são importantes para todos os fabricantes de motores devido ao atendimento às legislações existentes e a concorrência entre os fabricantes quanto ao consumo de combustível, assim gerando um diferencial em relação aos concorrentes no futuro.

O número de *Swirl* é medido em um equipamento formado por um gerador de fluxo de ar controlado, um tambor para retificar o fluxo de ar e controlar a pressão, um retificador de fluxo com medidor de torque (onde é medido o torque gerado pela turbulência), e uma base de montagem do cabeçote.

Um novo equipamento protótipo com uma nova tecnologia de medição mais rápida e precisa em relação aos existentes no mercado foi desenvolvida pela Universidade de São Paulo (USP) e este foi utilizado no estudo de caso.

Para este novo equipamento de medição do número de *Swirl*, foi desenvolvido o protótipo de um novo retificador de fluxo de ar e medição do torque gerado pelo *Swirl*, chamado de medidor de torque, sendo este o foco deste estudo.

Os demais componentes do equipamento de medição do número de *Swirl* são itens existentes no mercado, porém as integrações entre eles também fazem parte de um novo desenvolvimento.

O equipamento de medição do número de *Swirl* é classificado como um sistema de medição e este foi utilizado para avaliar o procedimento proposto. Portanto, este estudo testou o procedimento para estimação de uma medida de confiabilidade das medições obtidas no novo equipamento de medição do número de *Swirl*, garantindo seu correto funcionamento.

O protótipo do equipamento de medição do número de *Swirl* foi instalado em um laboratório de medição para realização dos testes.

O objetivo geral do estudo foi determinar um procedimento de trabalho para se estimar a confiabilidade das medições obtidas em sistemas de medição identificando os itens críticos de falha.

Este estudo está dividido em sete capítulos. Este capítulo, sendo o primeiro, descreve uma introdução aos itens abordados e uma descrição breve sobre número de *Swirl*, o segundo capítulo descreve os conceitos e parâmetros de capacidade e confiabilidade e os conceitos e modelos de regressão para teste de vida. O terceiro capítulo descreve o procedimento proposto para avaliação da capacidade em sistemas de medição e posteriormente a utilização de teste de vida acelerado para obter uma medida da confiabilidade, determinando o tempo de manutenção. No quarto capítulo um exemplo de aplicação prática do procedimento proposto é apresentado utilizando o equipamento de medição do número de *Swirl*. O quinto capítulo descreve uma

discussão do procedimento proposto com os pontos positivos e negativos e no sexto capítulo a conclusão do estudo realizado e algumas sugestões para trabalhos futuros. O sétimo capítulo contém as referências bibliográficas onde este estudo foi embasado.

2. CONFIABILIDADE, CAPABILIDADE E TESTE DE VIDA

2.1. Capabilidade

Existem várias definições de capabilidade em seus diversos campos da literatura. Porém, Lindbom et al. (2015) define capabilidade como:

Capabilidade refere-se aos recursos, sistemas, estruturas e processos necessários para entregar - atualmente e no futuro - o nível de desempenho exigido no cumprimento do objetivo principal (LINDBOM et al., 2015, p. 46, tradução nossa).

Os produtos e processos contém especificações que geralmente estão ligadas à sua função principal, onde, controle estatístico do processo (CEP – Controle estatístico do processo) é uma ferramenta utilizada para monitorar e melhorar os processos garantindo estas especificações (MONTGOMERY, 2009).

O CEP utiliza de métodos de medição para controlar os processos de produção, isto é, a capabilidade do processo, consequentemente a qualidade destas medições influenciam nestes resultados.

Com a necessidade de garantir a qualidade das medições, a análise do sistema de medição (MSA - *Measurement System Analysis*) verifica a capabilidade do sistema de medição representar a correta medida que está sendo avaliada e garantir que as medições realizadas no futuro tenham a mesma informação (MONTGOMERY, 2009).

As variações nos resultados obtidos nos sistemas de medição podem ser caracterizadas como (AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010):

- a) Capabilidade: variação das medidas em um curto período de tempo;
- b) Desempenho: variação das medidas em um longo período de tempo;
- c) Incerteza: estimativa dos valores obtidos que estão dentro do valor esperado.

2.1.1. Análise de sistema de medição

MSA pode ser definido como a maneira de entender e gerenciar erros de medição uma vez que este avalia e tenta minimizar estes erros (TABISZ, 2003; TSU-MING; JIA-JENG, 2013).

MSA tem como objetivo, verificar se o sistema de medição é capaz, se a variação de medição é menor que a do processo a ser controlado e é utilizado para avaliar adequação e capacidade do sistema de medição (TABISZ, 2003; TSU-MING; JIA-JENG, 2013).

MSA classifica os componentes do sistema de medição de acordo com os seguintes parâmetros (MONTGOMERY, 2009; AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010; JURAN; GRZYNA, 1988; COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2009):

- a) Exatidão: proximidade para o valor de referência;
- b) Enviesamento: é o erro estatístico e sistemático entre a medida real e a obtida, diferença entre a média das medições e o valor de referência representado pelo gráfico 1;

Fonte: Automotive industry action group (2010, p. 6)

- c) Estabilidade: é a variação total obtida na mesma medida da mesma peça em um período de tempo e está representada pelo gráfico 2.

Estabilidade quantifica a mudança no enviesamento através do tempo. Estudo de estabilidade é utilizado para definir a frequência de calibração e manutenção. Estudo de estabilidade cientificamente assegura o comportamento previsível do sistema de medição através do tempo;

Gráfico 2 - Estabilidade

Fonte: Automotive industry action group (2010, p. 6)

- d) Linearidade: é a mudança do enviesamento durante a operação normal conforme representado pelo gráfico 3;

Gráfico 3 - Linearidade

Fonte: Automotive industry action group (2010, p. 7)

- e) Precisão: é a aproximação entre as repetidas medições;

- f) Repetibilidade: é a variação nas medidas devido ao erro aleatório no instrumento, sem a interferência do operador ou meio ambiente e está representada pelo gráfico 4;

Gráfico 4 - Repetibilidade

Fonte: Automotive industry action group (2010, p. 7)

- g) Reprodutibilidade: são as variações ocorridas na medição devido aos erros externos como operador, métodos e meio ambiente, através do tempo e está representada pelo gráfico 5;

Gráfico 5 - Reprodutibilidade

Fonte: Automotive industry action group (2010, p. 7)

- h) Desempenho do sistema de medição: é a estimativa da variação do sistema de medição;
- i) Sensibilidade: é determinada pelo projeto do equipamento. Representa quanto sensível são as alterações de manutenção nas condições de operação;

- j) Consistência: é o grau de mudança da repetibilidade através do tempo e está representado pelo gráfico 6;

Fonte: Automotive industry action group (2010, p. 6)

Onde UCL é o limite superior de controle (*Upper Control Limit*) e LCL é o limite inferior de controle (*Lower Control Limit*).

- k) Uniformidade: é a mudança da repetibilidade durante as condições normais de uso e está representada pelo gráfico 7;

Fonte: Automotive industry action group (2010, p. 7)

- l) Resolução: é a menor escala de medida possível do equipamento de medição. Por padrão o sistema de medição deve ter resolução menor que 1/20 (ou 5%) da tolerância especificada (NORMA ISO 22514-7, 2012).

Comumente, os erros de medição avaliados são: enviesamento, repetibilidade, reprodutibilidade, estabilidade e linearidade.

Modelo matemático para estudos de capacidade dos sistemas de medição de acordo com MSA, pode ser definido pela equação 1 (MONTGOMERY, 2009):

$$y = x + \epsilon \quad (1)$$

Onde, y é o total de medições observadas, x é o valor real da medida e ϵ é o erro.

Assumindo que x e ϵ são variáveis aleatórias com distribuição normal e independente, isso significa que $\mu = 0$ e variabilidade (σ_p^2) e ($\sigma_{\text{medidor}}^2$) respectivamente. A variância total é dada pela equação 2 (MONTGOMERY, 2009; AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010; COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2009):

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{\text{medidor}}^2 \quad (2)$$

Onde, σ_{total} é o desvio padrão da variabilidade total, σ_p é o desvio padrão da variabilidade do produto e σ_{medidor} é o desvio padrão da variabilidade do medidor.

É comumente utilizado, mas não necessário, utilizar outras medidas de capacidade do sistema de medição, sendo elas descritas a seguir (MONTGOMERY, 2009; AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010):

- a) Desvio padrão da variabilidade do medidor (σ_{medidor}) pode ser estimado conforme equação 3 (MONTGOMERY, 2009):

$$\sigma_{\text{medidor}} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (3)$$

Onde, $\bar{R}$ é a média das diferenças entre a maior e menor medida em cada amostra e d_2 é uma constante que depende da amostra, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Constante para carta de controle

		Tamanho subgrupo																		
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Número dos subgrupos	1	1.0 1.41421	2.0 1.91155	2.9 2.33887	3.8 2.48124	4.7 2.67253	5.5 2.82981	6.3 2.96288	7.0 3.07794	7.7 3.17905	8.3 3.26909	9.0 3.35016	9.6 3.42378	10.2 3.49116	10.8 3.55333	11.3 3.61071	11.9 3.66422	12.4 3.71424	12.9 3.76118	13.4 3.80537
	2	1.9 1.27931	3.8 1.80538	5.7 2.15069	7.5 2.40484	9.2 2.60438	10.8 2.76779	12.3 2.90562	13.8 3.02446	15.1 3.12869	16.5 3.22134	17.8 3.30463	19.0 3.38017	20.2 3.44922	21.3 3.51287	22.4 3.57156	23.5 3.62625	24.5 3.67734	25.5 3.72524	26.5 3.77032
	3	2.8 1.23105	5.7 1.76858	8.4 2.12049	11.1 2.37883	13.6 2.58127	16.0 2.74681	18.3 2.88628	20.5 3.00643	22.6 3.11173	24.6 3.20526	26.5 3.28931	28.4 3.36550	30.1 3.43512	31.9 3.49927	33.5 3.55842	35.1 3.61351	36.7 3.66495	38.2 3.71319	39.7 3.75857
	4	3.7 1.20621	7.5 1.74989	11.2 2.10522	14.7 2.36571	18.1 2.56964	21.3 2.73626	24.4 2.87656	27.3 2.99737	30.1 3.10321	32.7 3.19720	35.3 3.28163	37.7 3.35815	40.1 3.42805	42.4 3.49246	44.6 3.55183	46.7 3.60712	48.8 3.65875	50.8 3.70715	52.8 3.75268
	5	4.6 1.19105	9.3 1.73857	13.9 2.09601	18.4 2.35781	22.6 2.56263	26.6 2.72991	30.4 2.87071	34.0 2.99192	37.5 3.09808	40.8 3.19235	44.0 3.27701	47.1 3.35372	50.1 3.42381	52.9 3.48836	55.7 3.54787	58.4 3.60328	61.0 3.65502	63.5 3.70352	65.9 3.74914
	6	5.5 1.18083	11.1 1.73099	16.7 2.08985	22.0 2.35253	27.0 2.55795	31.8 2.72567	36.4 2.86680	40.8 2.98829	45.0 3.09467	49.0 3.18911	52.8 3.27392	56.5 3.35077	60.1 3.42097	63.5 3.48563	66.8 3.54522	70.0 3.60072	73.1 3.65253	76.1 3.70109	79.1 3.74678
	7	6.4 1.17348	12.9 1.72555	19.4 2.08543	25.6 2.34875	31.5 2.55460	37.1 2.72263	42.5 2.86401	47.6 2.98568	52.4 3.09222	57.1 3.18679	61.6 3.27172	65.9 3.34866	70.0 3.41894	74.0 3.48368	77.9 3.54333	81.6 3.59888	85.3 3.65075	88.8 3.69936	92.2 3.74509
	8	7.2 1.16794	14.8 1.72147	22.1 2.08212	29.2 2.34591	36.0 2.55208	42.4 2.72036	48.5 2.86192	54.3 2.98373	59.9 3.09039	65.2 3.18506	70.3 3.27006	75.2 3.34708	80.0 3.41742	84.6 3.48221	89.0 3.54192	93.3 3.59751	97.4 3.64941	101.4 3.69806	105.3 3.74382
	9	8.1 1.16361	16.6 1.71828	24.9 2.07953	32.9 2.34370	40.4 2.55013	47.7 2.71858	54.5 2.86028	61.1 2.98221	67.3 3.08896	73.3 3.18370	79.1 3.26878	84.6 3.34585	90.0 3.41624	95.1 3.48107	100.1 3.54081	104.9 3.59644	109.5 3.64838	114.1 3.69705	118.5 3.74284
	10	9.0 1.16014	18.4 1.71573	27.6 2.07746	36.5 2.34192	44.9 2.54856	52.9 2.71717	60.6 2.85898	67.8 2.98100	74.8 3.08781	81.5 3.18262	87.9 3.26775	94.0 3.34486	99.9 3.41529	105.6 3.48016	111.2 3.53993	116.5 3.59559	121.7 3.64755	126.7 3.69625	131.6 3.74205
	11	9.9 1.15729	20.2 1.71363	30.4 2.07577	40.1 2.34048	49.4 2.54728	58.2 2.71600	66.6 2.85791	74.6 2.98000	82.2 3.08688	89.6 3.18174	96.6 3.26690	103.4 3.34406	109.9 3.41452	116.2 3.47941	122.3 3.53921	128.1 3.59489	133.8 3.64687	139.4 3.69558	144.7 3.74141
	12	10.7 1.15490	22.0 1.71189	33.1 2.07436	43.7 2.33927	53.8 2.54621	63.5 2.71504	72.6 2.85702	81.3 2.97917	89.7 3.08610	97.7 3.18100	105.4 3.26620	112.7 3.34339	119.9 3.41387	126.7 3.47879	133.3 3.53861	139.8 3.59430	146.0 3.64630	152.0 3.69503	157.9 3.74087
	13	11.6 1.15289	23.8 1.71061	35.8 2.07316	47.3 2.33824	58.3 2.54530	68.7 2.71422	78.6 2.85627	88.1 2.97847	97.1 3.08544	105.8 3.18037	114.1 3.26561	122.1 3.34282	129.8 3.41333	137.3 3.47826	144.4 3.53810	151.4 3.59381	158.1 3.64582	164.7 3.69457	171.0 3.74041
	14	12.5 1.15115	25.7 1.70914	38.6 2.07213	51.0 2.33737	62.8 2.54452	74.0 2.71351	84.7 2.85562	94.9 2.97787	104.6 3.08487	113.9 3.17984	122.9 3.26510	131.5 3.34233	139.8 3.41286	147.8 3.47781	155.5 3.53766	163.0 3.59339	170.3 3.64541	177.3 3.69417	184.2 3.74002
	15	13.4 1.14965	27.5 1.70804	41.3 2.07125	54.6 2.33661	67.2 2.54385	79.3 2.71290	90.7 2.85506	101.6 2.97735	112.1 3.08438	122.1 3.17938	131.7 3.26465	140.9 3.34191	149.8 3.41245	158.3 3.47742	166.6 3.53728	174.6 3.59302	182.4 3.64505	190.0 3.69382	197.3 3.73969
	16	14.3 1.14833	29.3 1.70708	44.1 2.07047	58.2 2.33594	71.7 2.54326	84.5 2.71237	96.7 2.85457	108.4 2.97689	119.5 3.08395	130.2 3.17897	140.4 3.26427	150.2 3.34154	159.7 3.41210	168.9 3.47707	177.7 3.53695	186.3 3.59270	194.6 3.64474	202.6 3.69351	210.4 3.73939
	17	15.1 1.14717	31.1 1.70623	46.8 2.06978	61.8 2.33535	76.2 2.54274	89.8 2.71190	102.8 2.85413	115.1 2.97649	127.0 3.08358	138.3 3.17861	149.2 3.26393	159.6 3.34121	169.7 3.41178	179.4 3.47677	188.8 3.53666	197.9 3.59242	206.7 3.64447	215.2 3.69325	223.6 3.73913
	18	16.0 1.14613	32.9 1.70547	49.5 2.06917	65.5 2.33483	80.6 2.54228	95.1 2.71148	108.8 2.85375	121.9 2.97613	134.4 3.08324	146.4 3.17829	157.9 3.26362	169.0 3.34092	179.7 3.41150	190.0 3.47650	199.9 3.53640	209.5 3.59216	218.8 3.64422	227.9 3.69301	236.7 3.73890
	19	16.9 1.14520	34.7 1.70480	52.3 2.06862	69.1 2.33436	85.1 2.54187	100.3 2.71111	114.8 2.85341	128.7 2.97581	141.9 3.08294	154.5 3.17801	166.7 3.26335	178.4 3.34066	189.6 3.41125	200.5 3.47626	211.0 3.53617	221.1 3.59194	231.0 3.64400	240.5 3.69280	249.8 3.73869
	20	17.8 1.14437	36.5 1.70419	55.0 2.06813	72.7 2.33394	89.6 2.54149	105.6 2.71077	120.9 2.85310	135.4 2.97552	149.3 3.08267	162.7 3.17775	175.5 3.26311	187.8 3.34042	199.6 3.41103	211.0 3.47605	222.1 3.53596	232.8 3.59174	243.1 3.64380	253.2 3.69260	263.0 3.73850
d_2		1.12838	1.69257	2.05875	2.32593	2.53441	2.70436	2.8472	2.97003	3.07751	3.17287	3.25846	3.33598	3.40676	3.47193	3.53198	3.58788	3.64006	3.68896	3.735
cd		0.876	1.815	2.738	3.623	4.4658	5.2673	6.0305	6.7582	7.4539	8.1207	8.7602	9.3751	9.9679	10.5396	11.0913	11.6259	12.144	12.6468	13.1362

Fonte: Automotive industry action group (2010, p. 203)

- b) A taxa para tolerância (P/T) é um comparativo da estimativa da capacidade com a faixa de tolerância estabelecida em projeto. Valores menores que 0,1 são recomendados. P/T é dado pela equação 4 (MONTGOMERY, 2009; COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2009; PAN, 2006):

$$\frac{P}{T} = \frac{k \cdot \sigma_{\text{medidor}}}{UCL - LCL} \quad (4)$$

Onde, k é uma constante. O valor de $k = 5,15$ corresponde ao valor limite do número do desvio padrão entre limites de um intervalo de tolerância de 95%, que contém, pelo menos, 99% de uma população normal e $k = 6$ corresponde para o número de desvios padrão entre os limites habituais da tolerância natural de uma população normal.

- c) A taxa da variabilidade do processo (ρ_p) da variabilidade total e a taxa da variabilidade do sistema de medição (ρ_m) da variabilidade total, que são dadas pelas equações 5 e 6 respectivamente:

$$\rho_p = \frac{\sigma_p^2}{\sigma_{\text{total}}^2} \quad (5)$$

$$\rho_m = \frac{\sigma_{\text{medidor}}^2}{\sigma_{\text{total}}^2} \quad (6)$$

- d) Razão sinal-ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*), é o número de níveis distintos ou categorias que podem ser fielmente obtidos a partir das medições. Um número menor que 5 e maior que 2 é recomendado para um sistema de medição aceitável. SNR é dado pela equação 7 (MONTGOMERY, 2009; AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010):

$$SNR = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_p}{1 - \rho_p}} \quad (7)$$

- e) Taxa de discriminação (DR – *Discrimination Rate*) determina o número de categorias que o sistema de medição é capaz de distinguir. DR deve ser maior que 4. DR é dado pela equação 8 (MONTGOMERY, 2009):

$$DR = \frac{1 + \rho_p}{1 - \rho_p} \quad (8)$$

Devemos considerar que os parâmetros acima realmente não descrevem a capacidade do sistema de medição devido serem subjetivos e dependem de uma interpretação, nem sempre valores fora do esperado refletem um sistema de medição não capaz, porém são uma referência (LINDBOM et al., 2015).

Entretanto, os parâmetros acima focam na precisão do instrumento que é resultado da variação do mesmo equipamento medindo a mesma amostra, não a sua exatidão que se refere a diferença entre a medida real e o real valor da amostra. A figura 1 apresenta uma relação entre a exatidão e precisão, onde o ponto ao centro é o valor de referência e os pontos ao seu redor são as medições obtidas.

Figura 1 - Relação exatidão x precisão

Fonte: Montgomery (2009, p. 372)

Para análise da exatidão requer o uso de um padrão onde suas características de medida são conhecidas. A exatidão pode ser modificada realizando ajustes no equipamento ou suas propriedades como uma curva de calibração.

2.1.2. Índices da capacidade do sistema de medição (Cg e Cgk)

A repetibilidade do sistema de medição pode ser medida através de índices. A forma geral dos índices de capacidade do sistema de medição (C_{ms}) são definidos conforme a equação 9 (NORMA ASTM E2281-15, 2015; NORMA ISO 22514-7, 2012; NORMA ISO 3354, 2012; AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010):

$$C_{ms} = \frac{0,3 \cdot (UCL - LCL)}{6 \cdot \sigma} \quad (9)$$

Onde, UCL é o limite superior, LCL é o limite inferior e σ é o desvio padrão das medições dado pela equação 10:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{\bar{X}})^2}{r-1}} \quad (10)$$

Onde “r” é o número de medições, x_i é o valor medido e $\bar{\bar{X}}$ é a média dos valores medidos.

O termo 0,3 significa a porcentagem utilizada do intervalo de tolerância para cálculo do índice, este pode estar entre 10 e 30 por cento, portanto 0,1 à 0,3. O termo 6σ significa a porcentagem da variação utilizada, 4σ significa 95,45% e 6σ significa 99,73%.

Na indústria em geral, em sistemas de medição, são utilizados dois índices. O primeiro chamado de índice de dispersão (C_g), representando o quanto os valores medidos estão dispersos em relação a média das medições. O segundo representa o quanto esta dispersão se afasta do valor de referência ou está centralizada em relação aos limites de inferior e superior, chamado índice de centralização (C_{gk}). Portanto, estes índices são dados pelo conjunto das equações 11, 12 e 13:

$$B_i = \bar{X} - N \quad (11)$$

Onde, B_i é a diferença entre média e valor de referência, $\bar{X}$ é a média dos valores medidos e “N” é o valor de referência.

$$C_{gk} = \frac{(0,1 \cdot T_{ol} \cdot |B_i|)}{2 \cdot \bar{\sigma}} \quad (12)$$

Onde, T_{ol} é o intervalo da tolerância especificada, ou seja, UCL - LCL.

$$C_g = \frac{0,2 \cdot T_{ol}}{4 \cdot \sigma} \quad (13)$$

Para considerar o sistema de medição aprovado, devemos obter valores de C_g e C_{gk} conforme segue:

- a) Valores C_g/C_{gk} abaixo de 0,5 são considerados inaceitáveis;
- b) Valores entre 0,5 e 1,33 são considerados aceitáveis de acordo com a necessidade do cliente;
- c) Valores acima de 1,5 são considerados aprovados.

Também é possível avaliar a capacidade dos sistemas de medição através da reprodutibilidade e repetitividade do sistema de medição (GRR - *Gauge Repeatability and Reproducibility*).

2.1.3. Reprodutibilidade e repetitividade do sistema de medição - GRR

Estudos de capacidade de sistemas de medição levam ao GRR que é estimar a repetitividade e reprodutibilidade dos componentes de medição com objetivo de verificar se o sistema é adequado a sua aplicação (SENVAR; OKTAY; SENIYE, 2010; AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010; COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2009; PAN, 2006; SLOOP, 2009).

O gráfico 8 é uma representação de como o GRR avalia o sistema de medição, onde o conjunto de medições do operador C tem ótima repetibilidade e reprodutibilidade, pois estão próximos ao valor de referência.

Ao contrário do conjunto de medições do operador A e B, ambos com o mesmo nível de repetibilidade, pois a curva gaussiana tem o mesmo formato, porém, o B tem uma maior reprodutibilidade, pois se aproxima mais do valor de referência.

Gráfico 8 – Repetibilidade e reprodutibilidade (GRR)

Fonte: Automotive industry action group (2010, p. 57).

Existem 3 métodos de análise do GRR: método das amplitudes, método das médias e amplitudes e o método da análise da variância (AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010).

Para considerar o sistema de medição aprovado conforme os métodos de GRR, devemos obter resultados em %GRR conforme segue (AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010; COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2009; SLOOP, 2009):

- a) Valores abaixo de 10% aprovam o sistema de medição;
- b) Valores entre 10% e 30% o sistema de medição pode ser aprovado para algumas aplicações ou conforme necessidade do cliente;
- c) Valores acima de 30% são considerados inaceitáveis.

A seguir, apresentamos as definições e forma de utilização dos três métodos.

2.1.3.1. Método das amplitudes

O método das amplitudes é uma maneira rápida de avaliar o sistema de medição, porém não decompõe a variabilidade da repetibilidade e reprodutibilidade (AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010; Norma ASTM F1469-11, 2011).

Para coletar as medições, deverão ser utilizados 2 operadores medindo 5 amostras, onde cada operador mede cada amostra uma vez. Com os valores obtidos, devemos calcular o GRR através das equações 14, 15 e 16:

$$\bar{R} = \frac{\sum R_i}{n} \quad (14)$$

Onde, “R” é a amplitude das medições por amostra (diferença entre a maior e menor medida), $\bar{R}$ é a média das amplitudes e “n” é o número de amostras.

$$GRR = \left(\frac{\bar{R}}{d_2} \right) \quad (15)$$

$$\%GRR = 100 \left(\frac{GRR}{\sigma} \right) \quad (16)$$

2.1.3.2. Método das médias e amplitudes

O método das médias e amplitudes, estima a repetibilidade e reprodutibilidade do sistema de medição (AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010; Norma ASTM F1469-11, 2011).

Para coletar as medições, devemos utilizar um número de amostras $n \geq 10$ a serem medidas por 3 ou mais operadores em ordem aleatória, repetindo todas as leituras pelos mesmos operadores por 3 vezes ou mais.

Com os valores obtidos, devemos seguir os seguintes passos para obter o valor de %GRR. Primeiramente devemos calcular a média aritmética das medições ($\bar{X}$), a média aritmética das amplitudes ($\bar{R}$) por operador, a média das amplitudes dos operadores ($\bar{\bar{R}}$) dada pela equação 17, a amplitude das médias das medições por operador ($\bar{X}_{diff}$) dada pela equação 18 e o limite superior de controle (UCL) dado pela equação 19:

$$\bar{\bar{R}} = \frac{(\bar{R}_1 + \bar{R}_2 + \bar{R}_n)}{n} \quad (17)$$

$$\bar{X}_{diff} = \bar{X}_{Max} - \bar{X}_{Min} \quad (18)$$

Onde, $\bar{X}_{Max}$ é o valor máximo das médias das medições por amostra e $\bar{X}_{Min}$ é o valor mínimo das médias das medições por amostra.

$$UCL = \bar{\bar{R}} \cdot D4 \quad (19)$$

Onde, D4 é uma constante sendo: 3,27 para 2 medições e 2,58 para 3 medições e representa o limite para os R individuais.

O segundo passo é calcular repetibilidade através da equação 20, sendo denominada de variação do equipamento (EV – *Equipment Variation*):

$$EV = \bar{\bar{R}} \cdot K_1 \quad (20)$$

Onde, K_1 é uma constante sendo: 0,8862 para 2 medições e 0,5908 para 3 medições.

O terceiro passo é calcular a reprodutibilidade pela equação 21, sendo denominado de variação do operador (AV – *Appraiser Variation*):

$$AV = \sqrt{(\overline{Xdiffx} \cdot K_2)^2 - \left(\frac{EV^2}{n \cdot r}\right)} \quad (21)$$

Onde, K_2 é uma constante, sendo 0.7071 para 2 medições e 0,5231 para 3 medições e “r” número de medições.

O quarto passo é calcular a variação por amostra (PV – *Part Variation*) pela equação 22:

$$PV = R_p \cdot K_3 \quad (22)$$

Onde, K_3 é uma constante sendo 0,7071 para 2 amostras, 0,5231 para 3 amostras, 0,4467 para 4 amostras, 0,4030 para 5 amostras, 0,3742 para 6 amostras, 0,3534 para 7 amostras, 0,3375 para 8 amostras, 0,3249 para 9 amostras e 0,3146 para 10 amostras e R_p é a amplitude das médias das medições por amostra

O quinto passo é calcular a variação total (TV – *Total Variation*) pela equação 23:

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} \quad (23)$$

O sexto passo é calcular o GRR pela equação 24:

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (24)$$

O sétimo passo é calcular as porcentagens de cada atributo:

%EV é dado pela equação 25.

$$\%EV=100 \left[\frac{EV}{TV} \right] \quad (25)$$

%AV é dado pela equação 26.

$$\%AV=100 \left[\frac{AV}{TV} \right] \quad (26)$$

%PV é dado pela equação 27.

$$\%PV=100 \left(\frac{PV}{TV} \right) \quad (27)$$

%GRR é dado pela equação 28.

$$\%GRR=100 \left(\frac{GRR}{TV} \right) \quad (28)$$

O oitavo passo é calcular o número de categorias distintas (*ndc – Number of Distinct Categories*) dado pela equação 29, que verifica a resolução do sistema de medição, sendo considerado aprovado obtendo um valor maior ou igual a 5.

$$ndc=1,41 \left(\frac{PV}{GRR} \right) \quad (29)$$

2.1.3.3. Método da análise da variância

O método da análise da variância (ANOVA – *Analysis of Variance*) é a mais utilizada, está decompondo a variância em 4 categorias: amostras, operadores, interação entre operadores e amostras e erro duplicado devido ao equipamento (AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010; TSU-MING; JIA-JENG, 2013).

Para coletar as medições, devemos utilizar um número de amostra $n \geq 10$ a serem medidas por 3 ou mais operadores em ordem aleatória, repetindo todas as leituras pelos mesmos operadores por 3 vezes ou mais (MONTGOMERY, 2009; AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010; NORMA ASTM E2782-11e1, 2011).

O modelo da equação 30 é utilizado para estimativa da variância do medidor:

$$\sigma_{\text{erro medição}}^2 = \sigma_{\text{medidor}}^2 = \sigma_{\text{repetibilidade}}^2 + \sigma_{\text{reprodutibilidade}}^2 \quad (30)$$

Considerando que se existem partes escolhidas aleatoriamente e operadores selecionados aleatoriamente, e cada operador medir cada peça “n” vezes, então as medições (i = parte, j = operador, k = medição) podem ser representada pelo modelo da equação 31 (MONTGOMERY, 2009; SHI; CHEN; LIANG, 2014):

$$y_{ijk} = \mu + P_i + O_j + (PO)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (31)$$

Onde, P_i é o parâmetro do efeito das amostras, O_j é o parâmetro do efeito dos operadores, PO_{ij} é o parâmetro do efeito das interações entre amostras e operadores e ε_{ijk} é o erro aleatório.

Os parâmetros do modelo P_i , O_j , PO_{ij} , e ε_{ijk} são variáveis aleatórias independentes que representem os efeitos das amostras, operadores, a interação ou a junção dos efeitos das amostras e operadores, e erro aleatório. Portanto, este é o modelo de efeitos e análise de variância (ANOVA), também às vezes chamada de modelo padrão

análise de R&R. Assumindo que as variáveis aleatórias P_i , O_j , PO_{ij} , e e_{ijk} são normalmente distribuídos com média zero, as variâncias (V) são dadas conforme segue:

Variância do efeito das amostras ($V(P_i)$) é dada pela equação 32:

$$V(P_i) = \sigma_p^2 \quad (32)$$

Variância do efeito das amostras ($V(O_j)$) é dada pela equação 33:

$$V(O_j) = \sigma_o^2 \quad (33)$$

Variância do efeito das interação entre amostras e operadores ($V((P_o)_{ij})$) é dada pela equação 34:

$$V((P_o)_{ij}) = \sigma_{po}^2 \quad (34)$$

Variância do erro aleatório $V(e_{ijk})$ é dada pela equação 35:

$$V(\varepsilon_{ijk}) = \sigma_{\text{erro}}^2 \quad (35)$$

Portanto a variação de qualquer observação é dada pela equação 36:

$$V(y_{ijk}) = \sigma_p^2 + \sigma_o^2 + \sigma_{po}^2 + \sigma_{\text{erro}}^2 \quad (36)$$

Onde, $\widehat{\sigma_{\text{erro}}}$ é a variância dos erros aleatórios, $\widehat{\sigma_{pxo}}$ é a variância da interação amostras e operadores, $\widehat{\sigma_o}$ é a Variância dos operadores e $\widehat{\sigma_p}$ é a variância das amostras.

Os métodos de análise de variância podem ser utilizados para análise da variância dos componentes. Portanto, a equação 37 pode ser deduzida na soma dos quadrados (SQ_{total}):

$$SQ_{total}=SQ_{amostras}+SQ_{operadores}+SQ_{pxo}+SQ_{erro} \quad (37)$$

Onde, $SQ_{amostras}$ é a soma dos quadrados da variância das amostras, $SQ_{operadores}$ é a soma dos quadrados da variância dos operadores, SQ_{pxo} é a soma dos quadrados da variância da interação entre os operadores e amostras e SQ_{erro} é a soma dos quadrados da variância dos erros aleatórios.

Cada soma dos quadrados é dividida pelo seu grau de liberdade para produzir os mínimos quadrados (MQ), portanto para amostras, operadores, erro aleatório e interação entre amostras e operadores, podemos definir as seguintes equações:

Mínimos quadrados das amostras (MQ_p) é dado pela equação 38:

$$MQ_p = \frac{SQ_{amostras}}{n-1} \quad (38)$$

Mínimos quadrados dos operadores (MQ_o) é dado pela equação 39:

$$MQ_o = \frac{SQ_{operadores}}{k-1} \quad (39)$$

Mínimos quadrados da interação entre os operadores e amostras (MQ_{pxo}) é dado pela equação 40:

$$MQ_{pxo} = \frac{SQ_{pxo}}{(n-1)(k-1)} \quad (40)$$

Mínimos quadrados dos erros aleatórios (MQ_e) é dado pela equação 41:

$$MQ_e = \frac{SQ_{erro}}{n.k(r-1)} \quad (41)$$

Portanto os valores esperados (E) para os mínimos quadrados são dados pelas equações a seguir:

Valores esperados das amostras ($E(MQ_p)$) é dado pela equação 42:

$$E(MQ_p) = \sigma_{\text{erro}}^2 + n \cdot \sigma_{po}^2 + k \cdot n \cdot \sigma_p^2 \quad (42)$$

Valores esperados dos operadores ($E(MQ_o)$) é dado pela equação 43:

$$E(MQ_o) = \sigma_{\text{erro}}^2 + n \cdot \sigma_{po}^2 + k \cdot n \cdot \sigma_o^2 \quad (43)$$

Valores esperados da interação entre os operadores e amostras ($E(MQ_{pxo})$) é dado pela equação 44:

$$E(MQ_{pxo}) = \sigma^2 + n \cdot \sigma_{po}^2 \quad (44)$$

Valores esperados dos erros aleatórios ($E(MQ_e)$) é dado pela equação 45:

$$E(MQ_e) = \sigma_{\text{erro}}^2 \quad (45)$$

Como o objetivo é obter a variância ($\hat{\sigma}$), estas equações podem ser descritas conforme as equações 46, 47, 48 e 49:

$$\widehat{\sigma_{\text{erro}}}^2 = MQ_e \quad (46)$$

$$\widehat{\sigma_{pxo}}^2 = \frac{MQ_{po} - MQ_e}{n} \quad (47)$$

$$\widehat{\sigma_o}^2 = \frac{MQ_o - MQ_{po}}{k \cdot n} \quad (48)$$

$$\widehat{\sigma_p}^2 = \frac{MQ_p - MQ_{po}}{k \cdot n} \quad (49)$$

Os valores de mínimo quadrados podem ser obtidos através de softwares de probabilidade como Minitab17[®] e Microsoft Excel[®].

σ_{erro}^2 é a Repetibilidade e $\sigma_o^2 + \sigma_{\text{pxo}}^2$ é a Reprodutibilidade, portanto a variância do medidor pode ser descrita conforme a equação 50:

$$\widehat{\sigma_{\text{medidor}}^2} = \widehat{\sigma_{\text{erro}}^2} + \widehat{\sigma_o^2} + \widehat{\sigma_{\text{pxo}}^2} \quad (50)$$

Em caso de se obter uma variância negativa, esta é considerada como zero.

O desvio padrão (σ) é mais facilmente entendido do que a variância, portanto na prática o EV, AV, PV, a interação dos operadores por amostra (IAP) e o GRR são dados pelas equações 51, 52, 53, 54 e 55 respectivamente:

Variação do equipamento (EV);

$$EV = 6\sqrt{MQ_e} \quad (51)$$

Variação do operador (AV):

$$AV = 6\sqrt{\frac{MQ_o - MQ_{\text{pxo}}}{n \cdot r}} \quad (52)$$

Variação por amostra (PV):

$$PV = 6\sqrt{\frac{MQ_o - MQ_{\text{pxo}}}{k \cdot r}} \quad (53)$$

Interação dos operadores por amostra (IAP):

$$IAP=6\sqrt{\frac{MQ_{pxo}-MQ_e}{r}} \quad (54)$$

GRR

$$GRR=6\sqrt{EV^2 + AV^2 + IAP^2} \quad (55)$$

A unidade base da variação é dada basicamente por 6 vezes o desvio padrão, sendo 99,73% do range.

A porcentagem EV também é dada pela equação 25, a porcentagem AV também é dada pela equação 26, a porcentagem PV também é dada pela equação 27, a porcentagem GRR também é dada pela equação 28 e ndc também é dado pela equação 29.

2.2. Confiabilidade

O conceito confiabilidade começou na segunda guerra mundial quando alemães introduziram os conceitos de confiabilidade para melhorar seus foguetes V-1 e V-2. Também nos Estados Unidos em meados de 1945-1950 o exército Norte Americano desenvolveu estudos em seus equipamentos militares resultando na criação de um comitê em confiabilidade pelo departamento de defesa em 1950. Logo no início dos anos 50 foi criado o IEEE (*Transactions on Reliability*) e o *processing of the national symposium on reliability and quality control* como resultado da necessidade de estudos de confiabilidade (DHILLON, 1983).

O conceito de confiabilidade inicialmente foi descrito como: a probabilidade que um produto irá operar por um período de tempo sem falhar (NÚÑEZ et al., 2013), porém a condição de falha depende de fatores de operação do produto que afetem diretamente seu funcionamento (COLOSIMO; FREITAS, 1997; NELSON, 1990). Portanto, confiabilidade pode ser definida como: a probabilidade de que um componente, equipamento ou sistema exerce sua função sem falhas, por um período

de tempo previsto, sob condições de operação especificadas (LAFRAIA, 2006; DHILLON, 1983, 1988; CHARLES, 1997; COLOSIMO; FREITAS, 1997, SUMMERVILLE, 2004; NETZEL; REDPATH; WALLACE, 2002).

Confiabilidade está geralmente associado a qualidade do produto, não se pode ter qualidade sem confiabilidade e da mesma forma, não se pode ter confiabilidade sem qualidade (SUMMERVILLE, 2004).

Qualidade pode ser definido quantitativamente como sendo a quantidade de produtos que satisfazem as necessidades dos clientes. Segundo Villemeur (1992 apud Norma ISSO-8402) qualidade é o conjunto das características de um produto ou serviço que lhe conferem a aptidão para satisfazer necessidades explícitas ou implícitas. A qualidade depende do sistema de produção e a conformidade com os procedimentos e tolerância de produção (CHARLES, 1997) por outro lado, confiabilidade está ligado à probabilidade que esse produto irá operar nas condições desejadas por um período de tempo sem falhar.

Um produto com baixa qualidade terá uma baixa confiabilidade, porém confiabilidade não depende somente da qualidade, outros fatores como o tempo e meio ambiente que interferem em seu resultado (CHARLES, 1997). Portanto:

Confiabilidade é a medida da qualidade durante algum período de tempo (SUMMERVILLE, 2004, p. 3, tradução nossa).

A confiabilidade envolve 4 fatores:

- a) Função requerida;
- b) Probabilidade;
- c) Condições de operação;
- d) Período de tempo.

A função requerida é a principal atividade pelo qual o produto foi desenvolvido que por algum motivo este deixou de executá-la, sendo assim havendo a falha do produto. Falha do item (componente, equipamento ou sistema) pode ser definida como sendo

a parada de operação, operação instável ou deterioração da operação (SHU-HO; MING-O, 1992; SINHA, 2015).

Defeito, fracasso e falha tem conceitos diferentes:

- a) Defeito é quando o componente deixa de atender os requisitos de projeto;
- b) Fracasso é quando o componente perde a capacidade de realizar a função requerida;
- c) Falha é quando o componente é incapaz de realizar a função requerida.

(VILLEMEUR, 1992; NETZEL; REDPATH; WALLACE, 2002)

Um mesmo evento pode obter os três conceitos dependendo da situação ocorrida, como por exemplo quando um prego entra em um pneu:

- a) O pneu com prego que não causa vazamento de ar é um defeito;
- b) O pneu com um prego causando o vazamento de ar perdendo a pressão interna a ponto de manter ainda uma condição de dirigibilidade segura é um fracasso;
- c) O pneu com um prego causando perda da pressão não possibilitando a direção segura do veículo é uma falha.

(VILLEMEUR, 1992)

Confiabilidade avalia a probabilidade de falha dos componentes, portanto as falhas podem ser classificadas de acordo com a velocidade (gradual ou repentina), grau (parcial ou completa) ou combinando velocidade e grau, catastrófica combinando repentina e completa ou degradação combinando gradual e parcial (VILLEMEUR, 1992).

As falhas possuem seus efeitos e suas causas. Os efeitos de falhas são classificados em:

- a) Falhas menores: podendo causar degradação da performance do sistema, danos insignificantes ao sistema ou entorno e sem danos a vida útil;
- b) Falhas significantes: degradação da performance do sistema, danos insignificantes ao sistema ou entorno e sem danos a vida útil;
- c) Falhas críticas: podendo causar degradação da função principal do sistema, danos significativos ao sistema ou entorno e risco a vida útil;
- d) Falhas catastróficas: podendo causar degradação da função principal do sistema, danos significativos ao sistema ou entorno e perda de vida útil.

(VILLEMEUR, 1992).

As causas da falha são definidas como a circunstância durante o projeto, manufatura ou uso que levaram o sistema falhar. São categorizadas como:

- a) Falhas primárias: falha do próprio componente, não causada diretamente ou indiretamente por outro componente;
- b) Falhas secundária: falha do componente devido a falha direta ou indireta de outro componente;
- c) Falha de comando: falha do componente devido a falha direta ou indireta de outro componente de comando.

(VILLEMEUR, 1992).

A figura 2 representa uma relação dos tipos de falha e suas possíveis causas.

Fonte : Villemeur (1992, p. 27)

As falhas são classificadas quanto a sua detectabilidade em:

- a) Falha intermitente: que ocorrem por um período de tempo desaparecendo sem nenhuma ação de manutenção corretiva;
- b) Falha passageira: falha intermitente de difícil detecção;
- c) Falha persistente (permanente): falha que persiste até uma ação de manutenção corretiva;
- d) Falha latente: falha nunca identificada.

(VILLEMEUR, 1992)

Toda a falha causa um modo de falhas que é o efeito observado de cada falha. Causa de falha e modo de falha se confundem entre si, porém são conceitos distintos. Causa

de falha é o que causou a falha do componente, por outro lado o modo de falha é o efeito gerado na função do componente.

A confiabilidade depende da especificação da função requerida e do critério de falha, como por exemplo: uma lâmpada irá falhar quando seu filamento se romper (falha catastrófica, primária e persistente) e sua confiabilidade será determinada através do tempo pelo qual o filamento irá se manter. No caso de um controle remoto podemos definir como falha quando não conseguimos acionar os comandos a uma distância maior que 30 metros (falha significativa, primária e intermitente) e sua confiabilidade será determinada através dos intervalos de tempo em que o controle irá falhar em um determinado período (YANG, 2007).

Em estudos de confiabilidade deve-se definir de forma clara e precisa o que será considerado como falha e qual sua escala de medida (COLOSIMO; FREITAS, 1997).

Em testes de durabilidade se espera que todas as amostras falhem de acordo com a unidade de medida considerada, porém em muitos casos isso não ocorre, algumas unidades podem ultrapassar o limite estabelecido sem acontecer a falha, estas unidades são chamadas de censuradas. Mesmo ocorrendo censura todas as amostras devem ser consideradas nos cálculos estatísticos.

Existem três tipos de censura:

- a) Censura à direita: um componente é censurado a direita quando este falhar em um tempo maior ou igual ao tempo total do teste;
- b) Censura à esquerda: um componente é censurado a esquerda quando este falhar em um tempo menor ou igual ao tempo do teste.

Probabilidade é a medida numérica da confiabilidade e altera conforme o tempo. Para medir a probabilidade existem algumas medidas da confiabilidade que serão discutidos a seguir. A primeira medida da confiabilidade é a função de densidade da probabilidade ($f(t)$) (pdf), demonstrada na equação 56, que indica a distribuição das falhas através do tempo, representando velocidade absoluta das falhas. Pouco utilizado como medida da confiabilidade, porém utilizado como base para as demais medidas (LAFRAIA, 2006).

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (56)$$

A segunda medida da confiabilidade é a função acumulativa de probabilidade ($F(t)$) (cdf), demonstrada na equação 57, que é a probabilidade em que o componente irá falhar em um determinado tempo (LAFRAIA, 2006).

$$F(t) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) \cdot dt \quad (57)$$

A terceira medida da confiabilidade é a função confiabilidade ($R(t)$), também chamada de função de sobrevivência, demonstrada na equação 58, esta é interpretada pela fração sobrevivente da população no tempo t . $R(t)$ é a probabilidade de sucesso. Que complementa a função acumulativa de probabilidade ($F(t)$) demonstrada na equação 59 (YANG, 2007).

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt = 1 - \int_{-\infty}^t f(t) \cdot dt = 1 - F(t) \quad (58)$$

Ou seja:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (59)$$

A quarta medida da confiabilidade é a função de risco ou taxa de falhas ($h(t)$ ou λ) demonstrada na equação 60, que mede a taxa de mudança na probabilidade em que os componentes bons não falharam em um pequeno intervalo de tempo (YANG, 2007).

$$h(t) = \frac{1}{R(t)} \left[\frac{d R(t)}{dt} \right] = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (60)$$

Existem três tipos de taxas de falha; taxa de falha decrescente (infância), taxa de falha constante (vida útil) e taxa de falha crescente (desgaste), que podem ser representados pela curva da banheira do gráfico 9, combinando as três funções, representando bem o comportamento do tempo de vida de alguns componentes onde a taxa de falha diminui no início de sua utilização, tornando constante durante sua vida útil e aumentando com o desgaste natural de suas partes (YANG, 2007; NETZEL; REDPATH; WALLACE, 2002).

Fonte: Yang (2007, p. 13)

A quinta medida da confiabilidade é a taxa acumulativa de falha ($H(t)$) é utilizada por alguns autores em análise gráfica para verificar a adequação de modelos probabilísticos e é dada pela equação 61 e representada no gráfico 10 em função do tempo (YANG, 2007; PATRICK; KLEYNER, 2012):

$$H(t) = \int_{-\infty}^t h(t) dt = \int_{-\infty}^t \frac{f(t)}{1-F(t)} dt \quad (61)$$

Gráfico 10 – Taxa acumulada de falhas

Fonte: YANG (2007, p. 16)

A sexta medida da confiabilidade é o percentil (t_p), este representa o tempo para qual uma fração específica da população (p) falha, sendo o inverso de $F(t)$ conforme equação 62 (YANG, 2007):

$$t_p = F^{-1}(p) \quad (62)$$

Na prática percentil é utilizado para caracterizar o tempo que uma pequena parte da população irá falhar.

A sétima medida da confiabilidade é a variância ($\text{Var}(t)$), esta representa a medida da dispersão da distribuição de vida dada pela equação 63:

$$\text{Var}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [t - E(t)]^2 f(t) dt \quad (63)$$

O gráfico 11 representa a relação gráfica entre os parâmetros de confiabilidade e o desvio padrão:

Gráfico 11 – Relação parâmetros de confiabilidade

Fonte; LAFRAIA (2006, p. 20)

A oitava medida da confiabilidade, é o tempo médio entre falhas (MTBF – *Mean Time Between Failure*). MTBF é o tempo médio entre as falhas de um componente em um determinado tempo de vida sobre condições específicas (YANG, 2007; RUSSELL, 2005).

A nona medida da confiabilidade, sendo a mais utilizada, é o tempo médio para falhar (MTTF – *Mean Time to Failure*). MTTF é o tempo médio para falha de um componente, equipamentos ou sistemas (YANG, 2007; RUSSELL, 2005).

Quando o tempo de reparo é muito pequeno comparado com o tempo de operação o valor numérico do MTBF e MTTF são próximos (YANG, 2007).

Portanto, o tempo esperado ($E(t)$) para que um componente exerça sua função requerida é dado pela equação 64 (YANG, 2007):

$$E(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (64)$$

Com isto, a MTBF e MTTF somente pode ser calculada quando a função de distribuição de falhas é especificada (YANG, 2007).

Note que MTBF e MTTF são somente médias, que alguns componentes irão falhar antes ou depois, não é um mínimo garantido (LEITCH, 1995).

As Condições de operação de um componente estão diretamente ligadas à sua confiabilidade. Não são somente as condições do clima, mas também (LEITCH, 1995):

- a) Embalagem, transporte e estoque;
- b) Instalação;
- c) O usuário;
- d) Recursos de manutenção;
- e) Sujeira, substâncias químicas e outros poluentes.

Embalagem, transporte e as áreas de estocagem são de extrema importância. Muitos componentes são delicados e o estresse aplicado durante o transporte, as condições de estoque em altas temperaturas e umidade podem reduzir em muito sua vida útil.

Durante a instalação o componente pode ser movimentado, exposto a sujeiras ou diferenças de temperatura que podem também afetar a vida útil.

O projeto de um componente deve ser capaz de garantir uma correta operação minimizando os efeitos de erros de operação.

Os recursos de manutenção devem ser bem treinados e as manutenções preventiva devem ser realizadas conforme previsto em projeto. Realizar manutenções preventivas nos componentes para garantir sua confiabilidade pode e deve ser considerado durante o projeto (LEITCH, 1995).

Período de tempo é um fator de redução da confiabilidade devido ao aumento da probabilidade de falhas, porém esse tempo não necessariamente pode ser definido em horas ou minutos, podemos defini-lo também em quilômetros rodados, ciclos efetuados ou a combinação entre eles.

Para um projeto obter a confiabilidade desejada deve ser considerado os itens abaixo:

- a) Simplicidade, manter o projeto mais simples possível;

- b) Utilizar componentes já provados;
 - c) Estresse e robustez (utilizar técnicas de projeto probabilística);
 - d) Redundância, onde é possível;
 - e) Controle do meio ambiente (identificar e anular altos estresse);
 - f) Testar cuidadosamente novos desenvolvimentos;
 - g) Utilizar dados de campo;
 - h) Identificar e eliminar modos de falha críticos;
 - i) Utilizar autodeteção e ajuste (utilizar detecção de falhas automática);
 - j) Detecção das falhas eminentes (utilizar sensores ou sistemas de alarme);
 - k) Considerar diagnostico nos itens críticos;
 - l) Manutenção preventiva;
 - m) Avaliação das tolerâncias (avaliação das tolerâncias quando os componentes não são favoráveis aos seus limites);
 - n) Engenharia humana, fazer concessões para erros humanos e mal-uso;
 - o) Evitar redução de custo nos gastos com confiabilidade;
 - p) Atenção aos aspectos de construção no que diz respeito a confiabilidade.
- (SUMMERVILLE, 2004, p. 91, tradução nossa)

Algumas ações de confiabilidade:

- a) Identificar os itens críticos de confiabilidade;
 - b) Identificar os itens críticos de meio ambiente (temperatura, altitude, estresse, etc);
 - c) Analise de estresse-esforço;
 - d) Analise de efeito e modo de falha;
 - e) Mecanismo de falha versus modos;
 - f) Tolerâncias e analise do pior caso;
 - g) Projeto robusto;
 - h) Considerar fatores humanos.
- (SUMMERVILLE, 2004, p. 92, tradução nossa)

2.3. FMEA

Análise do modo e efeito de falhas (FMEA - *Failure mode and effect analysis*) é uma ferramenta que auxilia na determinação da confiabilidade de produtos durante a fase de projeto e na detecção dos itens críticos para definir onde e como realizar os testes de vida (BERTOLINI; BEVILACQUA; MASON, 2006; BIROLINI, 2007; SOLOID STATE TECHNOLOGY, 2009).

FMEA é uma técnica indutiva, estruturada e lógica para identificar as causas e efeitos dos modos de falha de um sistema ou produto (LAFRAIA, 2006; AZADEH; SHEIKHALISHAHI; AGHSAMI, 2015).

FMEA foi inicialmente desenvolvido pela AIAG (*Automotive industry action group*) devido à má qualidade de informações recebida de pós-vendas no exterior (MAHESH et al., 2005), por outro lado Kouroush e Joseph (2015), menciona que FMEA foi criado em 1960 como parte do programa *U.S. minuteman rocket* com objetivo de encontrar falhas potenciais antecipadamente e diminuir desvios de projeto.

FMEA tem como objetivo:

O objetivo de um FMEA é identificar todos os modos e falha em potencial dentro de um projeto (de produto ou de processo), todas as probabilidades de falhas catastróficas e críticas, de tal maneira que elas possam ser eliminadas ou minimizadas através da correção do projeto, o mais cedo possível (COLOSIMO; FREITAS, 1997, p. 32).

FMEA tem as seguintes características gerais (COLOSIMO; FREITAS, 1997; KHODABANDEHLOO, 1996; BERTOLINI; BEVILACQUA; MASON, 2006):

- a) Pode ser realizado tanto para produto e processo;
- b) Parte da função do produto;
- c) Relaciona tipos (modos) de falha, efeitos, causas, riscos de ocorrência e mecanismos atuais de prevenção;
- d) Analisa assumindo que todas as condições de projeto estão de acordo com o projeto;

- e) É restrita a análise de falhas simultâneas, não obtendo elementos para quantificar a confiabilidade do produto;
- f) Análise do projeto a partir dos componentes (“*Bottom up*”).

A aplicação de FMEA traz os seguintes benefícios (LAFRAIA, 2006; BERTOLINI; BEVILACQUA; MASON, 2006):

- a) Redução do tempo de ciclo de um produto, custos de projeto, falhas potenciais, riscos para o consumidor (responsabilidade cível);
- b) Melhora do programa de testes de produtos;
- c) Desenvolve uma metodologia para a prevenção de defeitos ao invés de detecção e correção.

Para o desenvolvimento do FMEA, deve-se envolver representantes dos diversos departamentos da empresa como manufatura, engenharia de processos, engenharia do produto, compras, pós-vendas e etc, mapeando o produto ou processo e determinando suas funções, modos de falhas, efeitos dos modos de falha e suas causas. Para cada causa de falha é determinado um valor de 0 à 10 para a severidade da falha (G), um valor de 0 à 10 para a probabilidade de ocorrência da falha (F) e um valor de 0 à 10 para a probabilidade de detecção da falha (D). Multiplicando os três valores se obtém o número de prioridade de risco (RPN – Risk Priority Number) que determina a prioridade de cada plano de ação para causa de falha. Usualmente são utilizados RPN's maiores que 120 para efetuar ações de correção assim reduzindo o risco de a falha ocorrer (MAHESH et al., 2005).

2.4. FTA

Análise da árvore de falhas ((FTA) *Fault tree analysis*) é uma técnica qualitativa ou quantitativa de estudo de falhas potenciais de um sistema (LAFRAIA, 2006; COLOSIMO; FREITAS, 1997).

O desenho da árvore de falhas parte de um evento de topo, que é a falha principal a ser analisada. Este defeito principal é desdobrado em demais falhas (eventos básicos) que em conjunto ou individualmente, podem causar o evento de topo e consequentemente ocasionar a falha do sistema.

Diversos símbolos são utilizados no desenho da árvore de falhas, desde retângulos, diamantes, círculos e casas. Contudo, percebe-se que os símbolos mais utilizados são os retângulos, que representam eventos que podem ser desdobrados em níveis mais baixos, e os círculos, que representam eventos onde não há a possibilidade de maiores desdobramentos (LAFRAIA, 2006).

A análise de árvore de falhas tem os seguintes benefícios (LAFRAIA, 2006):

- a) Aprofunda os conhecimentos do sistema e sua confiabilidade;
- b) Detecção de falhas singulares, desencadeadoras de eventos de catastróficos e da sequência de eventos mais prováveis;
- c) Possibilita tratamento de riscos em dados quantitativos;
- d) Diferentes níveis de complexidade;
- e) Ótimos resultados somente com a forma qualitativa;
- f) Permite determinar falhas difíceis de serem detectadas e as partes críticas para teste de produtos;
- g) Ferramenta visual;
- h) Ajuda a determinar a causa da falha e a interação entre as demais causas.

FTA é uma análise de cima para baixo e FMEA e de baixo para cima (KOUROUSH; JOSEPH, 2015). A tabela 2 mostra uma comparação entre FMEA e FTA:

Tabela 2 – Comparação FMEA x FTA

Característica (melhor para:)	FTA	FMEA
Analisar falhas múltiplas.	X	
Analisar falhas isoladas.		X
Evitar a análise de falhas não críticas.	X	
Identificar eventos de alto nível causado por eventos de nível mais baixo.	X	
Ter uma abrangência maior ao analisar a falha.		X
Ter menos restrições e ser mais fácil de seguir.	X	
Identificar influencias externas.	X	
Identificar características críticas.		X
Prover um formato para validação dos planos.		X
Característica (deveria ser usada quando:)		
Análise quantitativa.	X	
Não há necessidade de se garantir que a falha de cada componente seja analisada.		X
Informação é limitada às características do sistema e funções básicas.	X	
Informação de projeto detalhadas em desenhos e especificações.		X
Avaliar alternativas de projeto/abordagem.	X	
Avaliar redundâncias.	X	
Avaliar integridade do projeto, incluindo: detecção de falhas e segurança da falha.		X
Análises dedutivas de cima para baixo.	X	
Análises indutivas de baixo para cima.		X

Fonte: Lafraia (2006, p. 131-132)

2.5. Análise do tempo de falha

Análise do tempo de falha (t) são técnicas estatísticas para estimação das medidas de confiabilidade através dos tempos de falha obtidos pelo uso ou através de testes de vida.

A seguir, serão descritas algumas das técnicas probabilísticas utilizadas em estudos de confiabilidade.

2.5.1. Estimação da função confiabilidade na ausência de censura, estimação não-paramétrica

Em estudos de confiabilidade a análise dos dados podem ser realizados de forma mais simples e conseqüentemente menos eficiente utilizando as estimativas não-paramétricas.

Quando todos os componentes falharam, portanto sem censura, a taxa de falhas é dada pela equação 65 (COLOSIMO; FREITAS, 1997; SUMMERVILLE, 2004):

$$h(t) = \frac{nf}{np} \quad (65)$$

Onde, nf é o número de falhas no intervalo, np é o número de produtos em operação.

A função confiabilidade é dado pela equação 66:

$$R(t) = \frac{np}{nt} \quad (66)$$

Onde, nt é o número de produtos sob teste.

2.5.2. Estimação da função confiabilidade na presença de censura, estimação não-paramétrica

Em estudos de confiabilidade o conjunto de dados amostrais de tempo de falhas apresentam dados censurados, onde técnicas estatísticas são utilizadas para análise destes dados. Apesar de os componentes censurados não falharem, estes nos dão parte da informação sobre o tempo de falha, isto é, que os componentes têm um tempo de falha maior que o tempo determinado do teste. Esta informação não deve ser desconsiderada.

Para analisar os dados dos tempos de falha estimadores não paramétricos são utilizados devido sua simplicidade sem a necessidade de especificar uma distribuição para a variável tempo até a falha (COLOSIMO; FREITAS, 1997).

Como técnica estatística de análise dos dados não-paramétrica utilizaremos a tabela de vida e o estimador de Kaplan-Meier (Km).

2.5.2.1. Tabela de vida

A tabela de vida ou método tutorial é uma das mais antigas técnicas estatísticas. Esta consiste em dividir o eixo do tempo em certos intervalos, e para cada um dos intervalos, estimar a probabilidade ($\hat{q}_i$) no intervalo de (t_{i-1}, t_i) dado pela equação 67:

$$\hat{q}_i = \frac{n_i}{n_r - \left(\frac{nc}{2}\right)} \quad (67)$$

Onde, n_i é o número de itens que falharam no intervalo (t_{i-1}, t_i) , n_r é o número de itens sob risco em t_{i-1} e nc é o número de itens censurado em t_{i-1} .

A função confiabilidade é a probabilidade de um item não falhar até o tempo t_i e é dada na tabela de vida pela equação 68 em função de q 's:

$$R(t_i) = (1-q_1) \cdot (1-q_2) \cdot \dots \cdot (1-q_i) \quad (68)$$

Apesar de ser bastante utilizada devido a amplitude dos intervalos de tempo ser de escolha arbitrária, o uso de poucos intervalos nos traz uma aproximação grosseira da função de confiabilidade (COLOSIMO; FREITAS, 1997).

O gráfico 12 apresenta um exemplo do estimador da tabela de vida para função de confiabilidade em função do tempo.

Gráfico 12 – Estimador da tabela de vida para função de confiabilidade

Fonte; COLOSIMO; FREITAS (1997, p. 82)

2.5.2.2. Estimador de Kaplan-Meier (Km)

Kaplan-Meier ou limite-produto considera tantos intervalos de tempo quanto for o número de falhas distintas, portanto a função confiabilidade é dada pela equação 69 e representada pelo gráfico 13 (COLOSIMO; FREITAS, 1997; COLOSIMO; HUDSON, 2002):

$$\hat{R}(t) = \left(\frac{nfc_1 - d_1}{nfc_1} \right) \left(\frac{nfc_2 - d_2}{nfc_2} \right) \dots \left(\frac{nfc_i - d_i}{nfc_i} \right) \quad (69)$$

Onde, “d” é o número de falhas no tempo t_i e nfc é o número de itens sob risco que não falhou e não foi censurado em t_i (exclusive).

Gráfico 13 – Estimador de Kaplan-Meier para a função de confiabilidade

Fonte: COLOSIMO; FREITAS (1997, p. 85)

A variância do estimador de Kaplan-Meier é dada pela equação 70 chamada de Greenwood:

$$\widehat{Var}(R(t)) = R(t)^2 \left[\left(\frac{d_1}{nfc_1(nfc_1 - d_1)} \right) + \left(\frac{d_2}{nfc_2(nfc_2 - d_2)} \right) + \dots + \left(\frac{d_i}{nfc_i(nfc_i - d_i)} \right) \right] \quad (70)$$

Cálculo do MTTF ou MTBF em estimadores não-paramétricos não são bem estimadas. O MTTF pode ser considerado a área inferior do gráfico da função confiabilidade que no caso é a soma de todos os retângulos, pois é uma função escada. Porém se o maior tempo é uma censura, a função confiabilidade não atinge o valor 0 e MTTF fica subestimado. Portanto neste caso sua estimativa deve ser evitada. O mesmo serve para estimador tabela de vida (COLOSIMO; FREITAS, 1997).

2.5.3. Modelos probabilísticos – estimação paramétrica

Os modelos probabilísticos para análise estatística da confiabilidade, que são chamadas de paramétricas, requer a especificação de uma distribuição de probabilidade para o tempo de falha. Estas técnicas são mais eficientes que as não-paramétricas (COLOSIMO; FREITAS, 1997; PATRICK; KLEYNER, 2012).

A seguir, serão apresentados a distribuição exponencial, distribuição de Weibull e distribuição lognormal.

As distribuições de probabilidade são caracterizadas pelos seus parâmetros de forma e escala, portanto, métodos de estimativa dos parâmetros serão apresentados e uma técnica para escolha de qual modelo melhor representa a distribuição estudada.

2.5.3.1. Distribuição exponencial

Esta distribuição é caracterizada por ter uma função de taxa constante. As falhas acontecem de forma aleatória, que são causadas por fatores externos como choques ou sobrecarga acima do limite, portanto não são adequadas a falhas devido a degradação ou desgaste natural (YANG, 2007).

A distribuição exponencial é utilizada em radares, aviões, equipamentos eletrônicos dos veículos espaciais, satélites, equipamentos de comunicação, resistores, capacitores e redes de computadores.

Distribuição exponencial é definida pelo seu parâmetro de escala $\alpha \geq 0$ e parâmetro de forma $\delta = 1$.

Para distribuição exponencial temos as medidas de confiabilidade dados pelas equações 71 à 81 (YANG, 2007; COLOSIMO; FREITAS, 1997; CHARLES, 1997; BIROLINI, 2007; IRESO, 1982):

A taxa de falhas é dada pela equação 71:

$$\lambda = \frac{1}{\alpha} \quad (71)$$

Função de densidade da probabilidade é dada pela equação 72:

$$f(t) = \lambda e^{(-\lambda \cdot t)} \quad (72)$$

Função acumulativa de probabilidade é dada pela equação 73:

$$F(t) = 1 - e^{(-\lambda \cdot t)} \text{ sendo } t \geq 0 \quad (73)$$

Função de risco é dada pela equação 74, sendo esta igual a taxa de falhas:

$$h(t) = \lambda \quad (74)$$

Taxa acumulativa de falha é dada pela equação 75:

$$H(t) = \lambda \cdot t \quad (75)$$

O percentil é dado pela equação 76:

$$t_p = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{1}{1-p} \right) \quad (76)$$

Onde, λ é a taxa de falhas, “p” é o percentil de falha e t_p é o total de falhas esperado no percentil.

Função confiabilidade é dada pelas equações 77 e 78:

$$R(t) = \exp \left(-\frac{t}{MTBF} \right) \quad (77)$$

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \text{ sendo } t \geq 0 \quad (78)$$

Variância é dada pela equação 79:

$$\text{Var}(t) = \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2 \quad (79)$$

O MTBF é dado pela equação 80:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (80)$$

O MTTF é dado pela equação 81:

$$MTTF = t_p = \alpha \quad (81)$$

Em gráficos de linearização, a ser apresentado no capítulo 2.5.3.5, este é construído no eixo das ordenadas pela equação 82:

$$\text{Linearização } R(t): \ln(-\ln(R(t))) = \ln(t) - \ln(\alpha) \quad (82)$$

Relação com a distribuição do valor extremo: T tem distribuição exponencial com parâmetro α ; então, $\ln(t)$ tem distribuição do valor extremo com parâmetro de localização $\mu = \ln(\alpha)$ e escala $\sigma=1$ (COLOSIMO; FREITAS, 1997, p. 142).

Demonstrações gráficas da distribuição exponencial para as medidas da confiabilidade $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$, $h(t)$ e $H(t)$ versus o tempo de falha são demonstrados no gráfico 14:

Gráfico 14 – Demonstrações gráficas da distribuição exponencial

Fonte: YANG (2007, p. 18)

2.5.3.2. Distribuição Weibull

Uma das mais utilizadas técnicas para análise de dados de ensaio. Foi proposta originalmente por W. Weibull (1954) em estudos ao tempo de falha devido a fadiga de metais (COLOSIMO; FREITAS, 1997; CHARLES, 1997).

Apresenta uma grande variedade de formas onde a taxa de falhas é considerada monótona, isto é, crescente, constante ou decrescente, este sendo um dos motivos de sua popularidade. Utilizada para descrever a vida de mancais, componentes eletrônicos, cerâmicas, capacitores e dielétricos (COLOSIMO; FREITAS, 1997; CHARLES, 1997).

Para distribuição de Weibull temos dois parâmetros, β ou $\delta \geq 0$ de forma e $\alpha \geq 0$ de escala, portanto temos as medidas da confiabilidade dados pelas equações 83 à 90 (YANG, 2007; COLOSIMO; FREITAS, 1997; PATRICK; KLEYNER, 2012; IRESON, 1982):

Função de densidade da probabilidade é dada pela equação 83:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} t^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \text{ sendo } t > 0 \quad (83)$$

Função acumulativa de probabilidade é dada pela equação 84:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \text{ sendo } t > 0 \quad (84)$$

Função de risco é dada pela equação 85:

$$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \text{ sendo } t > 0 \quad (85)$$

Taxa acumulativa de falha é dada pela equação 86:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \text{ sendo } t > 0 \quad (86)$$

Função confiabilidade é dada pela equação 87:

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right) \text{ sendo } 0 \leq t < \infty \quad (87)$$

O percentil é dado pela equação 88:

$$t_p = \alpha [-\ln(1-p)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (88)$$

O MTTF é dado pela equação 89:

$$MTTF = E(t) = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (89)$$

Variância é dada pela equação 90:

$$\text{Var}(t) = \alpha^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (90)$$

Onde respectivamente função gama $\Gamma(x)$ é dado pela equação 91:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (91)$$

Relação com a distribuição do valor extremo: T tem distribuição Weibull (α ; β); então, $\ln(t)$ tem distribuição do valor extremo com parâmetro de locação $\mu = (\ln(\alpha))$ e escala $\sigma=1/\beta$ (COLOSIMO; FREITAS, 1997, p. 143).

Demonstrações gráficas da distribuição de Weibull para as medidas da confiabilidade $f(t)$, $F(t)$, $h(t)$, $H(t)$, $R(t)$ e λ versus o tempo de falha são demonstrados nos gráficos 15 e 16:

Gráfico 15 - Demonstrações gráficas da distribuição de Weibull

Fonte: Yang (2007, p. 21)

Gráfico 16 – Demonstrações gráficas para distribuição de Weibull

Fonte: LEITCH (1988, p. 128)

As equações acima β é um parâmetro de forma adimensional e α parâmetro de escala ou característica de vida e tem a mesma unidade de " t ". β demonstra a forma da distribuição onde:

- a) $\beta < 1$ a taxa de falha é decrescente, está relacionada a mortalidade infantil, corresponde as falhas do início da produção (PATRICK; KLEYNER, 2012);
- b) $\beta > 1$ a taxa de falha é crescente, está relacionada com o desgaste, corresponde ao final da vida do componente. Se é apresentada no início da vida do componente representa um sinal de sérios problema de projeto (PATRICK; KLEYNER, 2012);
- c) β é igual a 1 a taxa de falha é constante, está relacionada a vida útil, corresponde a ponto médio da vida do componente com falhas

aleatória (PATRICK; KLEYNER, 2012), portanto a distribuição de Weibull é reduzida a distribuição exponencial e α é o MTTF (YANG, 2007; LEITCH, 1995);

- d) $\beta > 6$ a taxa de falhas é acelerada e os dados das análises são um pouco suspeito. Muitas censuras resultam em um β alto. Apesar de não ser comum, em componentes velhos, sistemas químicos e biológicos podem ter $\beta > 6$. Novas análises com diferentes opções devem ser realizadas (PATRICK; KLEYNER, 2012);
- e) $\beta > 10$ os dados são muito suspeitos portanto, são raramente utilizado na prática (PATRICK; KLEYNER, 2012).

2.5.3.3. Distribuição lognormal

Como a distribuição de Weibull a lognormal é muito utilizada para determinar o tempo de vida de componentes como semi-condutores onde mecanismo de falha envolve interações químicas (corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas, degradação de contatos e etc.) e mecanismo de falhas por fadiga em materiais (COLOSIMO; FREITAS, 1997).

Os parâmetros da distribuição lognormal são: μ é o parâmetro de escala e σ é o parâmetro de forma; $-\infty < \mu < \infty$ e $\sigma > 0$ (YANG, 2007; CHARLES, 1997).

Para a distribuição lognormal temos as medidas da confiabilidade dados pelas equações 92 à 99 (YANG, 2007; IRESON, 1982):

Função de densidade da probabilidade é dada pela equação 92:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left\{-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \text{ sendo } t > 0 \quad (92)$$

Função acumulativa de probabilidade é dada pela equação 93:

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left\{-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (93)$$

O percentil é dado pela equação 94:

$$tp = \exp(\mu + p\sigma) \quad (94)$$

Tempo esperado é dado pela equação 95:

$$E(t) = \exp(\mu + 0.5\sigma^2) \quad (95)$$

Variância é dada pela equação 96:

$$\text{Var}(t) = \exp(2\mu + \sigma^2) [\exp(\sigma^2) - 1] \quad (96)$$

Função confiabilidade é dada pela equação 97:

$$R(t) = \Phi\left(-\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (97)$$

Onde Φ é a função de distribuição acumulada de uma normal padrão, ou seja, uma normal com média igual a zero e desvio-padrão igual a um.

Função de risco é dada pela equação 98:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \text{ sendo } t > 0 \quad (98)$$

O MTTF é dado pela equação 99:

$$\text{MTTF} = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (99)$$

Para $\mu=1$ e diversos valores de σ temos demonstrações gráficas representado as medidas da confiabilidade $f(t)$, $F(t)$, $h(t)$ e $H(t)$ versus o tempo de falha no gráfico 17:

Gráfico 17 – Demonstrações gráficas para função lognormal

Fonte: Yang (2007, p. 29)

2.5.3.4. Método para estimativa dos parâmetros dos modelos

Os modelos exponencial, Weibull e lognormal são caracterizados por parâmetros, estes parâmetros devem ser estimados de tal forma a atender aos resultados esperados pela análise.

Existem várias formas de estimação dos parâmetros, os mais utilizados são a máxima verossimilhança ou os papeis de probabilidade. Estes tem um forte componente subjetivo e não fornecem uma precisão, por este motivo a estimativa de máxima verossimilhança deve ser preferido (COLOSIMO; FREITAS, 1997; CHARLES, 1997; YANG, 2007), por outro lado Patrick e Kleyner (2012), Colosimo e Freitas (1997), Charles (1997) e Yang (2007), exemplifica que atualmente existem vários softwares que realizam estas análises baseadas nos papeis de probabilidade e na estimativa de máxima verossimilhança exemplo Weibull++, SAS®, SYSTAT®, Minitab17® e etc.

A estimativa de máxima verossimilhança pode ser definida conforme descrito a seguir.

Para o modelo de distribuição exponencial existe uma solução fechada estimação do parâmetro α dado pela equação 100:

$$\frac{1}{\alpha} = \lambda = \frac{nf}{\sum_{i=1}^{nfc} t_i + (nfc - nf)tr} = \frac{nf}{T} \quad (100)$$

Sendo T definido pelas equações 101, 102 e 103:

Dados completos:

$$\sum_{i=1}^{nfc} t_i ; nf=nfc \quad (101)$$

Dados com censura do tipo I:

$$\sum_{i=1}^{nf} t_i + (nfc - nf)tt \quad (102)$$

Dados com censura do tipo II:

$$\sum_{i=1}^{nf} t_i + (nfc - nf)tr \quad (103)$$

Onde, t_i é o tempo do teste e tr é o tempo de falha da última unidade.

(CHARLES, 1997; COLOSIMO; FREITAS, 1997; SUMMERVILLE, 2004)

Para o modelo de Weibull com dois parâmetros a estimativa do parâmetro β por máxima verossimilhança é encontrada resolvendo a equação 104 (CHARLES, 1997):

$$g(\hat{\beta}) = \frac{\sum_{i=1}^{nf} t_i^{\hat{\beta}} \ln t_i + (nfc - nf) t_s^{\hat{\beta}} \ln t_s}{\sum_{i=1}^{nf} t_i^{\hat{\beta}} + (nfc - nf) t_s^{\hat{\beta}}} - \frac{1}{\hat{\beta}} - \frac{1}{nf} \sum_{i=1}^{nf} \ln t_i = 0 \quad (104)$$

O parâmetro de escala α é estimado pela equação 105:

$$\hat{\alpha} = \left\{ \frac{1}{nf} \left[\sum_{i=1}^{nf} t_i^{\hat{\beta}} + (nfc - nf) t_s^{\hat{\beta}} \right] \right\}^{1/\hat{\beta}} \quad (105)$$

Onde t_s é igual a 1 para dados completos. Quando os dados são de censura tipo I, t_s é igual a t_t e para dados de censura tipo II t_s é igual a tr .

A equação de $g(\hat{\beta})$ deve ser resolvida, o método de Newton-Raphson pode resolver a equação não linear, isso requer resolver $\hat{\beta}$ iterativamente usando as equações 106 e 107:

$$\hat{\beta}_{j+1} = \hat{\beta}_j - \frac{g(\hat{\beta}_j)}{g'(\hat{\beta}_j)} \quad (106)$$

Onde:

$$g'(x) = \frac{dg(x)}{dx} \quad (107)$$

Para o modelo de lognormal a estimativa do parâmetro μ por máxima verossimilhança é encontrada resolvendo as equações 108, 109 e 110 (CHARLES, 1997):

$$\hat{\mu} = \sum_{i=1}^{nfc} \frac{\ln t_i}{nfc} \quad (108)$$

$$\hat{t}_{med} = e^{\hat{\mu}} \quad (109)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nfc} (\ln t_i - \hat{\mu})^2}{nfc}} \quad (110)$$

Os papéis de probabilidade podem ser definidos conforme descrito a seguir.

Para os modelos de Weibull demonstrado no gráfico 18 e lognormal demonstrado no gráfico 19, os papéis de probabilidade são os mais utilizados na ausência dos softwares.

Para o modelo de Weibull devemos seguir os seguintes passos (COLOSIMO; FREITAS, 1997; PATRICK; KLEYNER, 2012):

Para o eixo das ordenadas (y) de acordo com Colosimo e Freitas (1997, p. 118) devemos utilizar $1 - \hat{R}(t)$ da estimativa não paramétrica de Kaplan-Meier. Para Leitch (1995, p. 132) e Ireson, Coombs Junior e Moss (1996, p. 25 à 32) devemos utilizar a equação 111:

$$F = \frac{i-0,3}{nt+0,4} \quad (111)$$

Para o eixo das abscissas (x) devemos entrar com os tempos de falha, como este eixo existem dois ciclos, devemos escolher a escala mais apropriada de acordo com a grandeza das falhas (COLOSIMO; FREITAS, 1997).

Traçar uma linha reta entre os pontos obtidos no gráfico, se não for capaz de obter uma linha reta, o modelo de Weibull não é o mais adequado.

Uma linha paralela à obtida dos pontos do gráfico partindo do ponto de 63,2% no eixo das ordenadas é traçada, o cruzamento desta linha na escala superior nos dá uma estimativa de β (LEITCH, 1995; IRESON; COOMBS JUNIOR; MOSS, 1996).

Gráfico 18 – Gráfico de probabilidade de Weibull

Fonte: ReliaSoft Corporation, Acesso em: 13 maio 2016 às 15:35.

Para o modelo lognormal devemos utilizar o papel de probabilidade normal. O procedimento de utilização é similar ao de Weibull. Traçar uma reta vertical dos pontos de cruzamento da linha obtida com entre os pontos do gráfico e a linha de 15,85% e 50%, a diferença entre os valores obtido na escala superior é o parâmetro σ .

Gráfico 19 – Gráfico de probabilidade normal/lognormal

Fonte: ReliaSoft Corporation. Acesso em: 13 maio 2016 às 15:50.

2.5.3.5. Técnica para escolha do modelo

Identificar qual o melhor modelo de distribuição probabilística de acordo com Charles (1997) é:

Identificação da distribuição apropriada é uma arte e uma ciência (CHARLES, 1997, p. 359, tradução nossa).

Com a coleta dos dados, as técnicas gráficas são a forma mais utilizada para a escolha da melhor distribuição de probabilidade que represente os valores obtidos.

As técnicas gráficas são denominadas método 1 e método 2 por Colosimo e Freitas (1997, p. 110).

O método 1 é a comparação da função confiabilidade com o estimador de Kaplan-Meier. Este método é realizado seguindo os passos a seguir:

- a) Calcular a estimativa de Kaplan-Meyer;
- b) A partir dos parâmetros de cada modelo, calcular as funções confiabilidade;
- c) Construir gráficos de $R_{km}(t)$ versus $R(t)$;
- d) Verificar em qual gráfico os pontos estão mais próximos.

A distribuição de probabilidade que obter os pontos do gráfico mais próximos de uma reta, dá um indício de que esta representa a distribuição dos dados obtidos. Porém para confirmar esta suposição, devemos realizar o método 2.

O método 2 é construir o papel de probabilidade através da linearização da função confiabilidade. Este método é realizado seguindo os passos a seguir:

- a) Calcular a estimativa de Kaplan-Meier da função confiabilidade $R_{km}(t)$;

- b) Para os modelos Weibull e exponencial calcular a função confiabilidade linearizada $\text{Ln}(-\text{Ln}(R(t))) = \delta \text{Ln}(t) - \delta \text{Ln}(\alpha)$ ou para o modelo lognormal $\phi^{-1}(R(t)) = -1/\alpha (\text{Ln}(t) - \mu)$;
- c) Construir gráfico da função confiabilidade linearizada versus $\text{Ln}(t)$, onde “t” são os tempos onde ocorreram as falhas.

Compara os gráficos, o melhor modelo será onde os pontos estiverem mais alinhados sobre uma reta (CHARLES, 1997; COLOSIMO; FREITAS, 1997).

2.6. Teste de vida

As empresas para se manterem competitivas devem desenvolver produtos com alto nível de confiabilidade em um curto prazo e tempo. Para atingir estes objetivos, testes de vida dos produtos devem ser realizados para determinar a confiabilidade dos componentes, e melhorar conforme resultado dos testes, assim reduzindo custos no desenvolvimento e de garantia associados (COLOSIMO; FREITAS, 1997; NELSON, 1990).

Testes de vida de confiabilidade são necessários porque os projetos de produto não são perfeitos, e a confiabilidade estimada pelos seus desenvolvedores é via de regra menor que verificada na prática (CHARLES, 1997; SHU-HO; MING-O, 1992).

Em testes de vida de confiabilidade de acordo com Patrick e Kleyner (2012, p. 314) “nós devemos testar para causar falhas, não testar para demonstrar o sucesso atingido”, portanto, os testes de vida de confiabilidade devem utilizar as informações das possíveis falhas obtidas através do FMEA e FTA, e a definição dos componentes críticos para definição da função principal do componente como foco na análise das falhas.

Normalmente o resultado destes testes são os tempos de falha $t_1, t_2, \dots, t_n$, estes tempos são analisados com os métodos paramétricos de análise probabilística. Alguns tipos de teste de confiabilidade (CHARLES, 1997):

- a) Teste de queima (*“burn-in”*) e teste de tela: desenvolvido para eliminar ou reduzir a mortalidade infantil, resultando em eliminar as falhas para aceite do equipamento;
- b) Teste de aceite ou qualificação: demonstra através de teste de vida que os objetivos de confiabilidade do equipamento serão atendidos de acordo com as especificações;
- c) Testes sequenciais: avalia se os objetivos de confiabilidade e manutenibilidade foram atendidos ou não;
- d) Testes de vida acelerados: são técnicas para reduzir o período dos testes, acelerando as falhas de componentes com alta confiabilidade;
- e) Desenho experimental: são métodos estatísticos usualmente utilizado para isolar falhas e eliminá-las;
- f) Teste de crescimento da confiabilidade: usado para melhoria da confiabilidade.

Antes de se estabelecer um plano de teste devemos estabelecer alguns parâmetros (CHARLES, 1997):

- a) Objetivo do teste;
- b) Tipo do teste;
- c) Condições de operação e meio-ambiente;
- d) Número de itens à serem testados (tamanho da amostra);
- e) Duração do teste;
- f) Definir a falha.

O objetivo do teste levará a definição do tipo de teste. As condições de meio ambiente devem retratar o máximo possível as de operação do componente como temperatura, umidade, vibração, choque mecânico, contaminação, pessoas e etc (CHARLES, 1997; PATRICK; KLEYNER, 2012).

O número de itens à serem testados e a duração de teste podem ser estimados quando temos uma taxa de falhas constante, porém a precisão depende do número de falhas geradas, o que no início ainda não se é sabido, portanto experiências ou resultados de testes anteriores podem ser utilizados para planejar o teste de vida (PATRICK; KLEYNER, 2012).

A falha deve ser clara e objetiva e deve ser perseguida durante todo o período de teste. A definição da falha deve ser baseada no resultado do FMEA e FTA.

Este estudo está baseado em testes de vida acelerado, sendo este tipo de teste de vida descrito a seguir.

2.6.1. Teste de vida acelerados

Teste de vida acelerados (ALT – *Accelerated Life Test*) são os mais utilizados pela indústria, testar produtos em condições acima das especificações produz falhas antecipadamente, informações sobre a robustez do componente e redução de custos pela redução do tempo de testes (PATRICK; KLEYNER, 2012; CHARLES, 1997; COLOSIMO; FREITAS, 1997; BALAKRISHNAN; DONGHOON, 2009; BETHLEHEM, 1988; COLOSIMO; HUDSON, 2002; CHENG-HUNG et al., 2015; TANG; XU, 2005; NELSON, 2005; SOLID STATE TECHNOLOGY, 2009).

ALT compreende em submeter os componentes a níveis de estresse maior que o previsto em uso para reduzir o tempo de falha. Os dados obtidos são extrapolados de acordo com a relação estresse-resposta, para estimar a vida em condições normais de uso (YANG, 2007; CHENG-HUNG et al., 2015; TANG; XU, 2005).

Em ALT na fase de projeto e desenvolvimento os objetivos são (YANG, 2007):

- a) Comparar e avaliar a confiabilidade de materiais e componentes para avaliar os fornecedores;
- b) Determinar as melhores opções de projeto para decidir qual é a melhor opção;

- c) Confirmar a eficácia das alterações de projeto o antecipadamente possível;
- d) Avaliar a relação entre confiabilidade e stress para determinar as condições limite de operação;
- e) Descobrir modos de falha potenciais.

Os testes acelerados podem ser divididos em dois tipos (PATRICK; KLEYNER, 2012; YANG, 2007; COLOSIMO; FREITAS, 1997; SOUZA, 2013):

- a) Teste de vida acelerados (ALT – *Accelerated Life Test*) é quantitativo onde o objetivo é determinar/medir a confiabilidade do componente;
- b) Teste de degradação acelerados (HALT - *Hight Accelerated Life Test*) é qualitativo onde o objetivo é a melhoria da confiabilidade.

Este estudo terá foco nos ALT.

Os conceitos de falha, tipos de censura e demais conceitos de confiabilidade também são válidos para teste acelerados. Além disso as variáveis de estresse e forma de aceleração serão apresentadas a seguir.

2.6.1.1. Método de aceleração

Basicamente existem 4 métodos de aceleração representados na figura 3. Geralmente em ATL são utilizados uma ou dois métodos de aceleração (YANG, 2007; CHENG-HUNG et al., 2013; ESPINET et al., 2015; NELSON, 2005):

Figura 3 – Métodos de aceleração

Fonte: Yang (2007, p. 241)

Sobre carregamento, é o método mais utilizado podendo ser do ambiente, elétrico, mecânico, químico e etc.

A sobrecarga pode ser aplicada de forma constante, em níveis, progressivo, cíclico ou aleatório.

A sobrecarga de estresse constante é quando esta é aplicada de forma constante por todo o período do teste. Não é necessário que o mesmo estresse constante seja aplicado em todas as amostras, podemos ter vários níveis de estresse constante por grupo de amostras conforme gráfico 20 (YANG, 2007; ESPINET et al., 2015).

Gráfico 20 – Níveis de estresse

Fonte: Yang (2007, p. 242)

Na sobrecarga de estresse em níveis, as amostras são submetidas a um nível de estresse constante por um período de tempo conforme gráfico 21 e posteriormente o estresse é aumentado e permanece constante por mais um período de tempo. Isto continua até tempo definido ou até um número definido ou todas as amostras falharem.

É um tipo de teste efetivo para descobrir modos de falhas para componentes com alta confiabilidade, porém os modelos de análise dos dados de estresse em níveis não são bem definidos (YANG, 2007; NELSON, 2005).

Gráfico 21 – Estresse em níveis

Fonte: Yang (2007, p. 242)

A sobrecarga de estresse progressivo, o nível de estresse vai aumentando de forma constante, conforme gráfico 22, até atingir o final do teste ou quando todas as amostras ou um número de amostras definido falhar. Como no estresse em níveis os modelos de análise dos dados não são bem definidos (YANG, 2007; NELSON, 2005).

Gráfico 22 – Estresse progressivo

Fonte: Yang (2007, p. 243)

A sobrecarga de estresse cíclico, a sobrecarga é dada em um ciclo fixo ou em vibração sinusoidal conforme gráfico 23 (YANG, 2007; NELSON, 2005).

Gráfico 23 – Estresse cíclico

Fonte: Yang (2007, p. 243)

Em sobrecarga de estresse aleatório a sobrecarga é aplicada de forma aleatória e independente. Pode ser utilizado em vibração, porém quando essa é aleatória (YANG, 2007; NELSON, 2005).

O aumento da carga de uso pode ser com o aumento das distâncias, ciclos, revoluções, páginas e etc, sendo medido em hertz, ciclos por hora, revoluções por minuto, quilômetros por mês, páginas por minuto e etc.

Alterar o fator de controle é quando se muda os parâmetros de funcionamento ou parâmetros controlados durante a produção do item a ser testado.

Reduzir o limite de falha é considerar como falhas quando se atinge uma condição menor do que o limite definido em projeto.

Uma atenção especial deve ser tomada para que um método de aceleração não crie outro método de aceleração como sobrecarga (YANG, 2007).

2.6.1.2. Variáveis de estresse

As variáveis de estresse utilizadas nos testes devem ser as que gerem falhas no componente durante seu uso. Os mais utilizados são (YANG, 2007; NELSON, 2005):

- a) Temperatura constante é o mais utilizado porque temperatura acelera as falhas na maioria dos componentes. Temperatura pode gerar vários modos de falhas como oxidação (temperatura alta provém energia para reação química de oxidação), eletromigração (temperatura alta acelera a movimentação dos elétrons que causam a transferência de massa formando vazios e micro rachaduras), deformação (muitos materiais tem uma deformação plástica constante, perdendo sua capacidade elástica), interdifusão (alta temperatura aumenta a capacidade de transferência de massa de um material para o outro quando estes estão em contato, causando assim perda de resistência devido a deterioração de um dos componentes) (YANG, 2007);

- b) Ciclos térmicos é quando o componente em sua utilização é submetido a variações de temperatura como em um motor por ignição onde no início da utilização está frio e se aquece durante a realização de trabalho mecânico de eixo. Esta variação cíclica de temperatura gera microfissuras que se propagam com o tempo causando uma falha por fadiga (YANG, 2007);
- c) Umidade causa corrosão que degrada os metais, essa reação ocorre localmente formando fenda e microfissuras que causam falhas por fadiga. Existem dois tipos de medida de umidade, absoluta e relativa. Umidade absoluta é a quantidade de água em uma unidade de volume de ar úmido e umidade relativa é a porcentagem da quantidade de umidade atmosférica presente no ar se estivesse saturado. Em ciência e engenharia a umidade relativa é utilizada pois é uma função da umidade e temperatura. (YANG, 2007);
- d) Voltagem é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos. Geralmente altas voltagens diminuem a vida dos isoladores. O aumento da voltagem é utilizado para testar isolações e capacitores. Para contatos elétricos a alta voltagem em contato com unidade causa arco elétrico que causa erosão nos contatos elétricos (YANG, 2007);
- e) Corrente elétrica é utilizada para acelerar as falhas de motores, reles, condutores e etc, a corrente elétrica aumenta a temperatura e esta é transferida para os componentes ao seu redor. Corrente elétrica também acelera a corrosão (YANG, 2007);
- f) Vibração mecânica é o movimento de vai e vem limitado de um objeto em direções opostas alternadamente do seu ponto de equilíbrio. Existem dois tipos de vibração: sinusoidal onde sua forma no futuro é conhecida e é medida em Hertz (Hz_) e aleatória onde sua forma no futuro é imprevisível e é medida em densidade espectral de potência (PSD) expressa em g^2/Hz . Vibração causa fadiga, desgaste e perda das conexões (YANG, 2007).

2.6.1.3. Planejamento do teste

Como já descrito todos ALT tem um objetivo a ser cumprido, antes de elaborar um planejamento de teste deve-se definir o objetivo do teste. A partir daí, a forma do teste e o plano experimental devem ser especificados, assim obtendo baixo custo, menor duração dos testes possível e a máxima informação sobre o componente (COLOSIMO; FREITAS, 1997; ESPINET et al., 2015).

Forma do teste é subdividida em (COLOSIMO; FREITAS, 1997; NELSON, 2005):

- a) Escolha da medida de performance: em muitos produtos existem medidas normativas a serem atendidas e como medi-las em outros casos são determinações feitas pelo cliente;
- b) Condições de teste: deve simular as condições reais de uso exceto pelo estresse. Não sendo possível devemos extrapolar os resultados;
- c) Variável de estresse: em alguns componentes estas variáveis já são normalizadas, nos demais casos onde isto não é conhecido é preciso determinar através de experimentação;
- d) Forma de aplicação do estresse: escolher a forma de aplicação (constante, em níveis, etc). Estresse constante é preferido.
- e) Mecanismo de censura:
 - Tipo I, censura por tempo, onde o teste termina após um determinado tempo é geralmente utilizado em combinação com informações anteriores que nos auxilie a definir o tempo de duração;
 - Tipo II, censura por falha, onde o teste termina após um certo número de unidades terem falhado é geralmente utilizado quando temos pouca ou nenhuma informação sobre a durabilidade do componente;

- Tipo III, censura aleatório, onde um componente é retirado do teste por ter ocorrido uma falha diferente da estudada. É preferível utilizar o tipo de censura tipo I, por tempo.

Para se determinar um plano experimental devemos determinar (COLOSIMO; FREITAS, 1997):

- a) Número de níveis da variável de estresse: não deve ser muito pequeno que dificulte análise do modelo e nem grande que inviabilize os cálculos;
- b) Proporção de alocação em cada nível: quantidade de componentes deverão ser submetidos a teste em cada nível;
- c) Determinação dos níveis de estresse: não devem ser altos que produzam outros modos de falha indesejáveis. Muitas vezes testes anteriores ao teste acelerados são necessários;
- d) Tamanho da amostra: quantos componentes serão testados.

Geralmente, o tamanho da amostra é determinado por razões práticas ou econômicas, porém, é importante definir um tamanho de amostra que nos traga uma precisão das estimativas obtidas com base nos dados (CHENG-HUNG et al., 2015; HANCZAR; DOUGHERTY, 2013).

Deve-se determinar os 4 elementos acima em função da precisão desejada, portanto temos 3 propostas de planos experimentais:

- a) Planos tradicionais: fixar 3 ou 4 níveis de estresse com o mesmo número de unidades para cada nível;
- b) Plano ótimo: fixar 2 níveis de estresse com número de unidades desigual em cada nível. O nível mais alto é especificado. Os planos ótimos fornecem estimadores mais precisos nas condições de projeto;

- c) Plano de Compromisso: proposta intermediária, entre tradicionais e ótimos, utilizando 3 níveis de estresse: alto, intermediário e baixo. Existe o “compromisso” da proporção de alocação seja de 4:2:1 para os níveis de estresse.

Para planos de compromisso, pontos básicos devem ser seguidos (COLOSIMO; FREITAS, 1997):

- a) Utilizar 3 níveis de estresse;
- b) Definir maior nível de estresse;
- c) Planejar o tempo de teste;
- d) Escolher o nível mais baixo de estresse, sendo o mais próximo das condições de projeto;
- e) Especificar valores para a probabilidade de falha nas condições de alto estresse e de projeto;
- f) Definir tamanho da amostra que geralmente depende das condições físicas das instalações de teste ou através de cálculos;
- g) Especificar uma distribuição (exponencial, Weibull ou lognormal).

2.6.1.4. Relação estresse resposta

Em teste de vida acelerado quantitativo, devemos estimar a distribuição de falhas obtidas com o estresse aplicado na condição normal de uso, para isso devemos extrapolar os dados utilizando modelos que relacionam o estresse a vida do componente. Estes modelos são chamados de modelos de aceleração e são classificados em (YANG, 2007; ESPINET et al., 2015):

- a) Modelos físicos: utilizado quando se conhece como o estresse atua no material ou componente e seu mecanismo de falha através do tempo,

com esse conhecimento modelos matemáticos são atribuídos, em alguns casos estes modelos são simplificados devido a sua complexibilidade. Estes modelos são adequados para um mecanismo de falha específico, com isto, não devem ser utilizados para outros mesmo que sejam o mesmo produto, por este motivo não são muitos utilizados.

- b) Modelos quase-físicos: o mais comum utilizado é o modelo de aceleração onde é conhecido a teoria físico e química do material. Como os modelos não são derivados de um mecanismo de falha, estes são mais utilizados e se adequam melhor que os modelos empíricos;
- c) Modelos empíricos: em muitas situações não é conhecido as relações físico e químicas do estresse aplicado e sua relação ao seu mecanismo de falha, portanto modelos experimentais são desenvolvidos utilizando regressões lineares e não lineares.

2.6.1.4.1. Modelo de Arrhenius

A relação de Arrhenius é utilizada para relacionar o tempo de falhas onde a variável de estresse é temperatura como por exemplo dielétrico, plásticos e filamento de lâmpada (YANG, 2007; COLOSIMO; FREITAS, 1997; COLOSIMO; HUDSON, 2002).

Relação de Arrhenius é dada pela equação 112:

$$\ln(L) = a + \frac{b}{T} \quad (112)$$

Onde, “L” é a vida, $a = \ln(A)$ sendo “A” a constante que depende da propriedade do material, critério de falha, desenho do produto e outros fatores, $b = \frac{E_a}{K}$ sendo E_a a energia de ativação (Energy Activation) em elétrons-volts que pode estar entre 0,3 e 1,5 eV e é obtido através de testes, “k” é a constante de Boltzmann: $8,6171 \times 10^{-5}$ por K(Kelvin) e “T” é a temperatura absoluta.

Fator de aceleração de Arrhenius (Afa) é dado pela equação 113:

$$Afa = \frac{L}{L'} = \exp \left[\frac{Ea}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right) \right] \quad (113)$$

Onde, L' e T' são a vida a temperatura no estresse.

2.6.1.4.2. Modelo de potência inversa

A relação de potência inversa é utilizada para relacionar o tempo de falhas onde a variável de estresse é o tempo de uso como por exemplo, fadiga de materiais e isolantes (YANG, 2007; COLOSIMO; FREITAS, 1997).

A relação de potência inversa é dada pela equação 114:

$$\ln(L) = a + b(\ln f) \quad (114)$$

Onde, $a = \ln(A)$, é uma constante dependente das propriedades do material, projeto do produto, critério de falha e outros fatores. “A” também pode ser a função para outros estresses se aplicado simultaneamente, como por exemplo a temperatura. O termo “b” é igual a “B” e também é uma constante dependente das propriedades do material, projeto do produto, critério de falha e outros fatores. Em testes acelerados $B < 1$ geralmente é desconhecido antes do início dos testes, mas pode ser estimado usando dados históricos, testes preliminares ou tabelas. O termo “f” é a taxa de uso.

O fator de aceleração de potência inversa é dado pela equação 115:

$$A_{fpi} = \frac{L}{L'} = \left(\frac{f}{f'} \right)^B \quad (115)$$

2.6.1.5. Modelo de regressão

As relações, estresse resposta, apresentadas sugerem a definição de constantes, através de tabelas pré-determinadas, porém essa pratica leva a vícios nos resultados que não nos levam a valores precisos. Uma forma de realizar os cálculos é utilizando os modelos probabilísticos, realizando os testes em vários níveis de estresse e determinando as constantes baseado nos dados dos testes (COLOSIMO; FREITAS, 1997; YANG, 2007; COLOSIMO; HUDSON, 2002).

Nos modelos de regressão utilizamos um componente determinístico do estresse aplicado sendo a relação estresse resposta associada ao outro componente do modelo a parte probabilística, portanto:

Para cada nível da variável de estresse, estaremos supondo que o tempo de falha segue uma mesma distribuição de probabilidade e o que faz diferir um nível de estresse do outro são os valores dos parâmetros desta distribuição (COLOSIMO; FREITAS, 1997, p.181).

Modelo em forma geral é representado pela equação 116:

$$Y = \ln(t) = \mu(x) + \sigma\epsilon \quad (116)$$

Onde ϵ é o erro modelo de regressão e tem distribuição que independe da variável de estresse x .

A forma mais simples, de forma funcional, da dependência de $\mu(x)$ na variável e estresse x é dada pela equação 117:

$$\mu(x) = a + bX \quad (117)$$

Onde, $a = \beta_0$ e $b = \beta_1$, sendo β_0 e β_1 parâmetros do modelo de regressão

Portanto, o modelo de regressão é dado pela equação 118:

$$Y = \ln(t) = \beta_0 + \beta_1 X + \sigma \varepsilon \quad (118)$$

Para os modelos serão admitidos que a variabilidade entre os níveis de estresse é a mesma, o que em escala logarítmica se torna aproximadamente verdadeira (COLOSIMO; FREITAS, 1997).

2.6.1.5.1. Modelo de Arrhenius-Weibull e potência inversa-Weibull

O modelo segue as seguintes premissas (COLOSIMO; FREITAS, 1997; YANG, 2007):

- a) “t” tem distribuição Weibull ($\alpha; \beta$), então $Y = \ln(t)$ tem distribuição do valor extremo com parâmetro de locação $\mu = \ln(x)$ e escala $\sigma = 1/\beta$;
- b) Parâmetro de forma β constante, isto é independente da variável “x”, portanto a distribuição $Y = \ln(t)$ (valor extremo) tem parâmetro de escala $\sigma = 1/\beta$, sendo o mesmo para todos os níveis de estresse.

O modelo é dado pelas equações 118, 119 e 120:

$$Y = \ln(t) = \beta_0 + \beta_1 X + \sigma \varepsilon \quad (118)$$

Onde, ε tem distribuição do valor extremo padrão.

$$\mu = \ln[\alpha(x)] = 0 \quad (119)$$

$$\sigma = \frac{1}{\beta} = 1 \quad (120)$$

Nas condições acima quando $X=1/T$, sendo “T” a temperatura absoluta, para o modelo de Arrhenius-Weibull temos os parâmetros do modelo de regressão, β_0 igual a (A) e β_1 igual a E_a/k .

Portanto estimando os parâmetros estaremos estimando a energia de ativação e a constante “A”.

Nas condições acima quando $X=-\ln(f)$, onde “f” a variável de estresse, temos modelo de potência inversa-Weibull, e da mesma forma estimando os parâmetros do modelo, estaremos estimando as constantes de estresse resposta, β_0 igual a $\ln(A)$ e β_1 igual a ω .

2.6.1.5.2. Modelo de Arrhenius-lognormal e potência inversa-lognormal

O modelo segue as seguintes premissas (COLOSIMO; FREITAS, 1997; YANG, 2007):

- a) “T” tem distribuição lognormal $(\mu; \sigma)$, então $Y=\ln(t)$ tem distribuição normal com média $\mu(x)$ e variância σ^2 constante;
- b) O desvio padrão (σ) da distribuição $Y=\ln(t)$ é constante e independe da variável de estresse.

O modelo é dado pela equação 118:

$$Y = \ln(t) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \sigma \varepsilon \quad (118)$$

Onde, ε tem distribuição normal padrão ($\mu=0$ e $\sigma^2=1$)

Nas condições acima quando $X=1/T$, sendo “T” a temperatura absoluta, temos o modelo de Arrhenius-lognormal e quando $X=-\ln(f)$ temos o modelo potência inversa-lognormal.

Para ambos os casos (Modelo de Arrhenius-Weibull e potência inversa-Weibull) e (Modelo de Arrhenius-lognormal e potência inversa-lognormal) é assumido que o parâmetro de escala σ da distribuição $Y=\ln(t)$ é constante, se na prática isto não for verdadeiro o modelo pode não ser adequado.

2.6.1.5.3. Estimativa dos parâmetros do modelo

Para itens submetidos ao estresse “x” em “m” níveis de estresse ($i=1, 2, 3, \dots, m$) e em cada nível “n” itens são submetidos a teste, no final do teste, r_i tempos de falha são observados, e $n_i - r_i$ são censurados (COLOSIMO; FREITAS, 1997).

Utilizando o logaritmo e tempo de falha $Y_{ij}=\ln(t_{ij})$ onde j é a enésima observação (censurada ou não) no enésimo nível da variável de estresse “x” ($i=1, 2, 3, \dots, m$) ; $j=1, 2, 3, \dots, n_i$).

Para o modelo estudado na equação 116, temos a equação 121:

$$Y_{ij} = \ln(t_{ij}) = \mu(x_i) + \sigma \cdot \varepsilon_{ij} \quad (121)$$

O vetor do parâmetro do modelo é dado por $\theta=(\mu(x_i), \sigma)=(a; b; \sigma)$.

Para cada distribuição de probabilidade para o tempo t_{ij} devemos estimar o vetor θ através do método de máxima verossimilhança.

Estas estimativas podem ser realizadas através de softwares estatísticos.

É importante verificar se o modelo escolhido se ajusta aos dados experimentais obtidos, para isso um método de verificação deve ser utilizado. Para esta verificação é utilizado a análise de resíduos, definido por (COLOSIMO; FREITAS, 1997).

Simplificando o modelo proposto anteriormente das equações 116 e 117 temos as equações 122, 123 e 124, onde os resíduos são representados por e_{ij} :

$$Y_{ij} = a + b \cdot X_i + \sigma \cdot \varepsilon_{ij} \quad (122)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{(Y_{ij} - a - b \cdot X_i)}{\sigma} \quad (123)$$

Portanto:

$$\hat{\varepsilon}_{ij} = e_{ij} = \frac{(Y_{ij} - \hat{a} - \hat{b} \cdot X_i)}{\hat{\sigma}} \quad (124)$$

Onde, $Y_{ij} = Lnt$ sendo “t” o tempo de falha, $\hat{a} = \beta_0$ e $\hat{b} = \beta_1$.

Nas condições acima $X_i = 1/T$ (sendo “T” em Kelvin), para efeitos de cálculo utilizaremos 11604,83/t conforme equação 125 a fim de não obter valores muito pequenos (COLOSIMO; FREITAS, 1997; Minitab Inc., Acesso em: 27 jul. 2016).

$$X_i = \frac{11604,83}{T + 273,16} \quad (125)$$

Os resíduos são utilizados para buscar indícios de violação das suposições do modelo, como os métodos gráficos para avaliar as suposições com relação à distribuição dos dados experimentais e um gráfico dos resíduos e_{ij} contra os níveis de cada variável de estresse.

Da mesma forma, o gráfico que conter os pontos mais próximos de uma reta, aponta a distribuição que melhor representa o conjunto de dados.

3. PROCEDIMENTO DE ESTIMAÇÃO DA CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS OBTIDOS EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Um procedimento será apresentado como ferramenta para determinar a confiabilidade das medições, obtidas em sistemas de medição, e posteriormente a aplicação do procedimento proposto no equipamento de medição do número de *Swirl*.

No procedimento proposto, o primeiro passo a ser seguido é determinar a capacidade do equipamento de medição, este será apresentado através de um fluxograma de trabalho e aplicado ao equipamento de medição do número de *Swirl*. Após a capacidade obtida, testes de vida acelerado será proposto como a forma de obter a confiabilidade de equipamentos de medição e da mesma forma que na capacidade, este será apresentado através de um fluxograma de trabalho. Com os tempos de falha estimados em 3 diferentes temperaturas, será calculado a medida de confiabilidade MTTF do equipamento de medição do número de *Swirl*.

3.1. Procedimento para mensurar a capacidade

Para qualquer equipamento de medição, sua capacidade deve ser mensurada, assim determinando sua repetibilidade e reprodutibilidade. Testes devem ser realizados para mensurar a capacidade de equipamentos de medição, para isso o utilizaremos o MSA.

A figura 4 contém um fluxograma das atividades a serem realizadas para verificar a capacidade de um sistema de medição:

Figura 4 – Fluxograma geral para aplicação do MSA

Os testes de MSA devem ser realizados nas condições normais de uso, portanto, estas condições devem ser definidas e estabelecidas antes do início dos testes.

O segundo passo é aplicar o estudo de repetibilidade e variação denominado de técnica 1, realizando medições pelo mesmo operador com a mesma amostra por um número de repetições maior ou igual a 30. O número de repetições pode ser aumentado se os resultados não garantirem um nível de confiança. Após as medições serem realizadas, devemos calcular os índices de capacidade Cg e Cgk. Estes índices devem estar acima de 1,33.

Com a aprovação do Cg/Cgk, podemos iniciar os testes de Repetibilidade e Reprodutibilidade (GRR). Em equipamentos operados manualmente, onde as leituras de medida dependem do operador o estudo de GRR deverá ser realizado por mais de um operador repetindo as medições por mais de duas vezes na mesma amostra. em

um número de 10 amostras ou mais, sendo este denominado de técnica 2. Quando a instalação da amostra comprometer o resultado das medições, a amostra deve ser retirada do dispositivo de montagem e recolocada antes de iniciar uma nova medição. O número de operadores, repetições e amostras podem ser aumentados conforme os resultados não garantirem uma confiança. Sendo um equipamento que realiza as medições automaticamente, portanto as leituras não dependem do operador, o estudo de GRR deverá ser realizado por um operador repetindo as medições por mais de duas vezes na mesma amostra em um número de 10 amostras ou mais, sendo este denominado de técnica 3. O número de repetições e amostras podem ser aumentados conforme os resultados não garantirem uma confiança. Estas técnicas são comumente utilizadas na indústria, por este motivo estão sendo adotados no procedimento proposto.

Compilar as medições realizadas e calcular o GRR do equipamento, devendo este ser menor que 20% para aprovar o equipamento de medição. Na eventualidade do equipamento não ser aprovado, reavaliar o equipamento e efetuar ações de correção, repetindo os testes para validação das ações realizadas.

Com a aprovação dos índices de capacidade C_p e C_{pk} e o GRR, é iniciado os testes de vida acelerado para determinar a confiabilidade do sistema de medição.

3.2. Procedimento para estimativa da confiabilidade

O procedimento proposto para a estimativa da confiabilidade em sistemas de medição é a realização de testes sequenciais ou testes de vida acelerados. Itens de confiabilidade já conhecida, como por exemplo motores elétricos, sensores de pressão, sensor de distância, sistema de controle e bombas de ar e etc, não fizeram parte do estudo, pois estes dados podem ser obtidos em tabelas de teste de vida realizados anteriormente ou pela experiência obtida com a utilização em outras aplicações. Os testes devem ter o enfoque nos itens onde a confiabilidade não é conhecida.

A figura 5 contém um fluxograma das atividades a serem realizadas para medida da confiabilidade:

Figura 5 – Fluxograma geral para aplicação do estudo de confiabilidade

Antes de iniciar o planejamento dos testes de vida, para os itens de confiabilidade não conhecida, com o intuito de auxiliar no conhecimento e estudo do item, um estudo dos possíveis modos de falha potenciais deverá ser elaborado. Para realizar este estudo de forma lógica e estruturada, o FMEA deve ser utilizada, determinando as funções dos componentes em análise, seus possíveis modos de falha, os efeitos e suas causas. Determinar os índices de ocorrência das falhas, índices de gravidade das falhas para função principal e as probabilidades de detecção das falhas. Com estes índices, calcular e elaborar um plano de ação para RPN's maiores que 70. Este valor pode ser maior ou menor de acordo com a experiência ou uma determinação organizacional (MAHESH et al., 2005).

Com base nos modos de falha obtidos no FMEA, elaborar uma árvore de falhas (FTA) definindo o evento de topo, sendo este uma das falhas potenciais encontradas no estudo do FMEA, assim aprofundando a avaliação das falhas encontradas e suas possíveis causas.

Com o resultado do FMEA e FTA, a decisão da necessidade de um teste de vida deverá ser avaliada, assim evitando custos desnecessários, pois testes de vida na maioria dos casos são caros e levam tempo para serem concluídos. Quando se decide por efetuar teste de vida, um plano de teste deve ser estabelecido para que este seja realizado de forma estruturada evitando perdas de tempo e custos desnecessários.

O primeiro passo para o planejamento do teste de vida, deve-se definir o objetivo do teste. Quais os resultados esperamos obter com o teste a ser realizado, devendo este ser claro e objetivo.

O segundo passo é definir a falha a ser observada com base nos resultados do FMEA e FTA, servindo de base para definição dos parâmetros do teste a ser realizado. A falha a ser estudada deve ser clara e objetiva, servindo de base em todo o estudo. Testes de vida onde a falha não é clara, causam perda de tempo, pois vários modos de falha são obtidos e suas causas ficam de difícil análise e obtenção.

O terceiro passo é determinar as condições de operação, sendo estas baseadas nas condições reais de uso do componente em análise. Possíveis restrições físicas e econômicas para se obter tais condições devem ser avaliadas em detalhes, como por exemplo: a falta de espaço físico ou alto custo para se elevar a temperatura devido a

necessidade de fornos ou estufas. Condições de operação definidas erroneamente podem trazer falhas não desejadas ao estudo e levar a estudos inconclusivos.

O quarto passo é determinar o tamanho da amostra, levando em conta os custos e tempo disponibilizados para a realização do teste. Amostras pequenas não geram um número de dados suficiente para a estimação estatísticas das medidas de confiabilidade desejadas, por outro lado, amostras muito grandes são caras e levam mais tempo sobre teste, assim onerando o plano de teste.

O quinto passo é determinar a duração do teste, sendo determinado de acordo com a experiências obtida em testes anteriores, assim obtendo as falhas desejadas durante o teste. Não existindo os parâmetros de tempo para obtenção das falhas, os testes aleatórios iniciais com poucas amostras devem ser realizados para se obter maior experiência do componente em estudo. A duração do teste pode ser em tempo, censura tipo I, ou número de falhas, censura tipo II.

O sexto passo é definir o tipo de teste, este depende do grau de confiabilidade do componente em estudo. Testes sequenciais são para validação da confiabilidade ou quando o tempo de obtenção da falha estudada não for grande. Testes acelerados devem ser realizados para componentes onde durante seu projeto foram considerados parâmetros para obtenção de uma alta confiabilidade, portanto o tempo para se obter a falha em estudo será grande, assim aplicando métodos de aceleração para reduzir o tempo de obtenção das falhas e reduzir os custos dos testes.

Para testes sequenciais, os testes já podem ser realizados em todas as amostras, para testes de vida acelerado, ainda devemos estabelecer o método de aceleração, sendo este o sétimo passo, entre: sobrecarga, aumento da carga de uso, alterar fator de controle ou reduzir limite de falha. Pode-se utilizar um ou mais métodos de aceleração. Muitos métodos de aceleração associados dificultam a análise de regressão dos dados, portanto é recomendado a utilização de dois métodos de aceleração associados. Atentar para que o estresse de uso não crie outro método de estresse como sobrecarga.

O oitavo passo é definir o nível de estresse, pode ser constante, quando o nível de estresse é aumentado ao longo do tempo, progressivo quando o nível de estresse é aumentado de forma constante, cíclico ou aleatório. O mais recomendado é utilizar

mais de um nível de estresse constante, para facilitar a análise de regressão dos dados.

O nono passo é definir as variáveis de estresse de acordo com as condições de uso do componente tornando a obtenção das falhas esperadas no estudo mais rápida, possibilitando a regressão ao tempo normal de uso. Estas podem ser temperatura, umidade, voltagem, vibração ou etc.

O décimo passo é definir o mecanismo de censura, que pode ser do tipo I (censura por tempo, onde o teste termina após um determinado tempo), tipo II (Censura por falha, onde o teste termina após um certo número de unidades terem falhado) e tipo III (censura aleatório, onde um componente é retirado do teste por ter ocorrido uma falha diferente da estudada).

O décimo primeiro passo é determinar o número de níveis de estresse e a quantidade de amostras em cada nível, quando o nível de estresse não for constante. Estes parâmetros devem ser definidos de acordo com as experiências anteriores, porém se não existir estas informações, testes iniciais devem ser realizados para se obter um parâmetro mais confiável afim de evitar desperdícios.

Com o planejamento realizado e os parâmetros definidos os testes são realizados.

Após realização dos testes, os dados devem ser compilados e avaliados em sua qualidade (utilização do estimador de Kaplan-Meier). Com dados de boa qualidade aplicar modelos de regressão (Arrhenius-Weibull, e potência inversa-Weibull ou Arrhenius-lognormal e potência inversa-lognormal) para extrapolação para as condições reais de uso.

Com base nos resultados, calcular o MTTF. Com este dado podemos definir a probabilidade da vida do equipamento nas condições normais de uso e estabelecer rotinas de manutenções do operador, preventivas e preditivas do equipamento.

4. ESTUDO DE CASO – CONFIABILIDADE DAS MEDIÇÕES OBTIDAS NO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DO NÚMERO DE *SWIRL*

O estudo de caso foi realizado no equipamento de medição do número de *Swirl*. Este equipamento, conforme figura 6, é composto de atuador de válvulas, base de montagem do cabeçote, medidor de torque, tambor para retificar o fluxo de ar e controle da pressão, IHM (Interface Homem Máquina), motor elétrico e gerador de fluxo de ar controlado.

Figura 6 – Equipamento de medição do número de *Swirl*

O princípio de funcionamento é basicamente composto pela abertura das válvulas de admissão do cabeçote montado sobre a base, esta contendo as mesmas dimensões da câmara de combustão, em 15 milímetros pelo atuador de válvulas. Com isto o motor elétrico é acionado, propulsando o gerador de fluxo de ar até obter a vazão mássica e pressão desejada. O ar atravessa o medidor de torque onde é retificado. Para evitar que turbulências retornem ao medidor de torque e alterem os valores medidos, um tambor é montado logo após o medidor de torque. Este procedimento é realizado em 15 aberturas de válvula, variando em 1 milímetro entre cada etapa.

O valor a ser medido, número de *Swirl*, é um número adimensional, obtido através do fluxo de ar aspirado com vazão mássica e pressão controlada, passando por um cilindro com mesma dimensão do cilindro do motor. O movimento rotativo do fluxo de ar é retificado em uma colméia, montada dentro do medidor de torque, gerando o torque a ser medido. O torque é obtido através da medição do deslocamento linear de um braço de medição preso ao eixo da colméia conforme figura 7. O eixo é fixo ao corpo do medidor de torque pelos arames de tensionamento com uma tensão controlada.

Os parâmetros de rotação da bomba de ar, pressão e temperatura do ar após a colméia, ambos medidos no tambor para retificação do fluxo de ar, são partes do cálculo da vazão mássica de ar.

Figura 7 – Componentes medidor de *Swirl*

O estudo de caso foi realizado neste equipamento de medição do número de *Swirl* sendo sua função principal: realizar as medições de *Swirl* em cabeçotes de motores a

diesel de 13 litros com repetibilidade e reprodutibilidade de C_g/C_{gk} de 1,33 e GRR de 20%.

Com isto, a falha a ser estudada e perseguida é: perda do índice de C_g das medições ao longo do período de utilização, assim analisando a confiabilidade das medidas obtidas no equipamento de medição do número de *Swirl*. Como os demais itens do equipamento de medição do número de *Swirl* afetam os valores medidos, estes deveriam ser considerados no estudo, porém estes itens são de alta confiabilidade, podendo assim desconsiderar sua influência na perda de capacidade do equipamento. Portanto, os estudos de confiabilidade foram realizados com o foco no medidor de torque.

O medidor de torque também é o único equipamento totalmente desenvolvido no projeto, os demais são itens normalmente utilizado no mercado.

A seguir serão apresentados os cálculos de MSA e GRR e a medida de confiabilidade MTTF.

4.1. Cálculos da capacidade

Para o cálculo da capacidade foi utilizado a técnica 1 (repetibilidade) e a técnica 3 (repetibilidade e reprodutibilidade).

4.1.1. Fluxograma

A figura 8 contém um fluxograma das atividades a serem realizadas para verificar a capacidade do medidor de torque baseado no fluxograma da figura 4:

Figura 8 – Fluxograma do estudo para aplicação do MSA

Os testes de MSA foram realizados nas condições normais de uso, sendo de 22°C. O primeiro passo foi aplicar o estudo de repetibilidade e variação da técnica 1 até atingir um Cg e Cgk maior que 1,33. Posteriormente foi realizado os testes de Repetibilidade e Reprodutibilidade, a técnica 3, por se tratar de um equipamento automático, até atingir um valor menor que 20%.

A seguir serão apresentados dados e resultados da técnica 1 e técnica 3.

4.1.2. Resultados da técnica 1

Foram realizadas 30 medições com o cabeçote denominado de “A”, com a abertura de válvulas em 15 posições, abrindo em um milímetro entre cada posição, partindo da posição totalmente aberta. Para estabilização do fluxo e velocidade do ar, foi mantido

um tempo de estabilização de 15 segundos e posteriormente um sistema de controle coleta 1500 dados dos deslocamentos do braço de medição em milímetros, as pressões em milímetros de coluna de d'água, as temperaturas em °C e as rotações em rotações por minuto.

Para o cálculo do número de *Swirl* é utilizada a média aritmética dos 1500 dados coletados.

Para cada medição foram obtidos os dados contidos nas tabelas 3, 4, 5 e 6. A média dos valores obtidos por abertura, seu intervalo de variação e a porcentagem de variação em relação à média foram calculados.

Tabela 3 – Sensor de distância (técnica 1)

Aberturas	Sensor de Deslocamento																														Média	Maior valor	Menor valor	Variação	% Variação (10% de variação tolerável)
	Medições																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
1	0,0088	0,0080	0,0102	0,0087	0,0080	0,0080	0,0089	0,0083	0,0078	0,0094	0,0109	0,0099	0,0090	0,0093	0,0109	0,0104	0,0102	0,0112	0,0113	0,0115	0,0124	0,0125	0,0124	0,0128	0,0108	0,0128	0,0129	0,0130	0,0129	0,0130	0,0105	0,0130	0,0078	0,0052	1%
2	0,0940	0,0634	0,0710	0,0757	0,0785	0,0675	0,0699	0,0747	0,0791	0,0688	0,0653	0,0661	0,0684	0,0674	0,0754	0,0689	0,0698	0,0710	0,0685	0,0692	0,0708	0,0670	0,0703	0,0694	0,0820	0,0667	0,0690	0,0678	0,0764	0,0710	0,0714	0,0940	0,0634	0,0306	6%
3	0,1948	0,1911	0,1897	0,1931	0,1958	0,1943	0,1942	0,1906	0,1923	0,1922	0,1956	0,1940	0,1919	0,1941	0,1948	0,1919	0,1952	0,1972	0,1954	0,1955	0,1963	0,1915	0,1965	0,1929	0,1950	0,1998	0,1947	0,1996	0,1926	0,1996	0,1944	0,1998	0,1897	0,0100	2%
4	0,2590	0,2640	0,2695	0,2635	0,2668	0,2662	0,2681	0,2649	0,2654	0,2670	0,2651	0,2663	0,2683	0,2692	0,2695	0,2669	0,2685	0,2728	0,2636	0,2676	0,2705	0,2689	0,2718	0,2690	0,2656	0,2710	0,2709	0,2663	0,2633	0,2676	0,2672	0,2728	0,2590	0,0138	3%
5	0,4027	0,4117	0,4041	0,4046	0,4000	0,4111	0,4043	0,4035	0,3928	0,4072	0,4088	0,4027	0,4085	0,3999	0,4073	0,4045	0,4018	0,4138	0,4044	0,4098	0,4044	0,4103	0,4079	0,4112	0,4071	0,4076	0,4000	0,3970	0,4086	0,4040	0,4054	0,4138	0,3928	0,0210	4%
6	0,6390	0,6391	0,6390	0,6396	0,6392	0,6293	0,6445	0,6372	0,6428	0,6494	0,6507	0,6385	0,6339	0,6437	0,6450	0,6406	0,6400	0,6485	0,6403	0,6426	0,6515	0,6442	0,6432	0,6482	0,6442	0,6460	0,6471	0,6463	0,6402	0,6429	0,6425	0,6515	0,6293	0,0221	4%
7	1,0474	1,0532	1,0276	1,0897	0,9998	1,0824	1,0106	1,0248	1,0710	1,0291	1,0141	1,0438	1,0232	1,0389	1,0157	1,0450	1,0567	1,0398	1,0391	1,0713	1,0582	1,0613	1,0680	1,0858	1,0903	1,0595	1,0795	1,0772	1,0790	1,0617	1,0515	1,0903	0,9998	0,0905	18%
8	1,6234	1,6316	1,6144	1,6031	1,6420	1,6482	1,6136	1,6163	1,6163	1,6269	1,6306	1,6622	1,6226	1,5956	1,6143	1,6061	1,6266	1,6276	1,6440	1,6370	1,6398	1,6317	1,6272	1,6308	1,6263	1,6458	1,6497	1,6261	1,6276	1,6255	1,6278	1,6622	1,5956	0,0666	13%
9	2,0695	2,0563	2,0617	2,0509	2,1206	2,1133	2,0908	2,0525	2,0142	2,0484	2,0335	2,1069	2,0544	2,0299	2,0851	2,0166	2,0527	2,0929	2,0674	2,0632	2,0631	2,0793	2,0623	2,0670	2,0706	2,0578	2,0779	2,0340	2,0393	2,0468	2,0626	2,1206	2,0142	0,1064	21%
10	2,4292	2,4179	2,5004	2,4215	2,4951	2,5012	2,4787	2,4194	2,4071	2,4924	2,4381	2,5178	2,4469	2,3900	2,4744	2,4214	2,4274	2,5068	2,4223	2,4060	2,4442	2,4359	2,4468	2,4554	2,4222	2,4367	2,4067	2,4133	2,4360	2,4890	2,4467	2,5178	2,3900	0,1278	26%
11	2,7816	2,7999	2,8439	2,8357	2,8661	2,8672	2,8506	2,7974	2,8161	2,8832	2,7970	2,8666	2,7918	2,8040	2,8440	2,7625	2,8595	2,8638	2,8263	2,8202	2,8338	2,8251	2,8156	2,8093	2,8153	2,8172	2,8393	2,8022	2,8376	2,8612	2,8278	2,8832	2,7625	0,1208	24%
12	3,0433	3,1057	3,0906	3,0668	3,0984	3,0763	3,0746	3,0614	3,0763	3,0833	3,0593	3,1006	3,0482	3,0605	3,0847	3,0400	3,0865	3,0887	3,0969	3,0892	3,1204	3,0733	3,0835	3,0773	3,0527	3,0700	3,0935	3,0901	3,0876	3,0899	3,0790	3,1204	3,0400	0,0804	16%
13	3,2842	3,3387	3,3139	3,3181	3,3398	3,3339	3,2950	3,3133	3,3144	3,3168	3,3172	3,3358	3,3153	3,3157	3,3163	3,2892	3,3109	3,3312	3,3466	3,3267	3,3513	3,3451	3,3404	3,3182	3,3212	3,3461	3,3239	3,3338	3,3218	3,3462	3,3240	3,3513	3,2842	0,0672	13%
14	3,6651	3,6912	3,6926	3,6979	3,6913	3,7190	3,7013	3,7259	3,6788	3,7001	3,7301	3,6897	3,7370	3,7029	3,7544	3,7165	3,7285	3,7386	3,7183	3,7484	3,7424	3,7406	3,7166	3,7180	3,7005	3,7144	3,7201	3,7426	3,6949	3,6893	3,7136	3,7544	3,6651	0,0894	18%
15	3,9697	4,0270	4,0252	4,0121	4,0089	4,0071	3,9670	4,0296	4,0038	4,0097	4,0098	4,0147	4,0006	4,0235	4,0177	4,0134	4,0209	4,0311	4,0769	4,0336	4,0535	4,0380	4,0433	4,0385	4,0482	4,0344	4,0449	4,0366	4,0533	4,0264	4,0240	4,0769	3,9670	0,1099	22%

Tabela 4 – Sensor de pressão (técnica 1)

Aberturas	Sensor de pressão																														Média	Maior valor	Menor valor	Variação	% Variação da média		
	Medições																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30							
1	257,59	257,59	257,95	257,95	258,20	257,43	257,11	257,23	257,08	257,04	255,72	256,70	257,35	257,12	256,49	257,25	257,24	258,20	258,01	258,22	258,16	258,38	257,83	257,50	257,06	258,41	256,45	253,95	256,44	255,86	257,25	258,41	253,95	4,46	1,74%		
2	251,65	251,65	252,44	252,44	252,03	251,42	252,27	251,20	251,70	251,47	250,67	252,02	251,68	250,87	251,23	251,49	251,74	252,45	252,24	252,79	252,60	252,36	251,98	252,17	251,57	252,49	251,25	251,36	251,13	251,14	251,78	252,79	250,67	2,12	0,84%		
3	249,48	249,48	250,94	250,94	250,85	250,39	250,77	250,13	249,78	250,24	249,21	250,92	250,14	249,56	249,72	250,09	249,79	250,29	250,86	251,02	251,07	250,61	250,39	250,69	250,65	251,09	249,99	249,54	249,65	250,00	250,28	251,09	249,21	1,88	0,75%		
4	249,44	249,44	249,98	249,98	250,18	249,93	249,79	249,73	248,86	249,72	248,98	249,85	249,65	249,30	249,14	249,77	249,50	250,23	250,02	250,67	250,57	250,43	250,30	249,79	250,04	250,16	249,46	249,06	249,63	249,61	249,77	250,67	248,86	1,81	0,72%		
5	248,71	248,71	248,99	248,99	249,47	248,95	249,21	248,86	248,26	249,25	253,52	249,02	248,81	248,41	248,25	248,59	248,58	249,09	248,87	249,44	249,48	249,35	248,57	248,70	248,96	249,64	248,43	248,20	248,14	248,25	248,99	253,52	248,14	5,38	2,16%		
6	255,34	255,34	255,23	255,23	255,37	255,99	255,56	255,68	255,18	256,05	256,30	255,76	255,83	255,39	255,85	255,56	255,16	255,47	254,76	255,50	255,40	254,66	254,88	255,12	254,77	255,88	255,45	255,51	255,36	255,57	255,44	256,30	254,66	1,64	0,64%		
7	253,89	253,89	254,43	254,43	255,17	254,68	254,30	254,47	253,66	254,20	252,63	253,92	253,58	252,54	253,46	253,29	253,94	255,01	254,82	255,45	255,56	255,34	254,90	254,70	255,44	255,07	253,45	252,87	252,87	253,78	254,18	255,56	252,46	3,10	1,22%		
8	252,78	252,78	253,06	253,06	253,45	253,34	252,38	252,78	252,32	252,56	251,39	252,61	252,62	251,80	252,33	252,07	252,67	253,03	253,14	254,60	253,91	253,40	253,63	253,45	253,47	253,60	252,09	251,82	251,73	252,40	252,81	254,60	251,39	3,22	1,27%		
9	252,12	252,12	252,22	252,22	253,20	252,17	252,18	252,55	251,74	252,37	251,13	252,30	251,84	251,50	251,80	250,90	252,02	252,74	252,68	253,38	253,40	252,70	252,86	252,87	252,89	253,23	251,59	251,41	251,35	252,28	252,26	253,40	250,90	2,49	0,99%		
10	251,65	251,65	252,07	252,07	252,98	252,17	251,59	251,30	251,45	252,08	251,13	252,14	251,93	251,13	251,34	250,87	251,64	252,44	252,05	252,89	253,11	253,13	252,61	252,56	252,44	252,53	251,30	251,92	251,54	251,53	251,97	253,13	250,87	2,26	0,90%		
11	251,64	251,64	252,22	252,22	252,79	252,16	251,37	251,89	251,76	251,93	250,60	252,18	251,60	251,96	251,46	250,73	251,25	252,33	251,84	252,56	252,67	252,86	252,21	252,40	252,69	252,55	251,17	251,61	251,13	251,12	251,88	252,86	250,60	2,26	0,90%		
12	251,87	251,87	252,05	252,05	252,69	252,07	251,72	252,02	252,13	251,80	250,83	252,55	251,73	251,80	250,83	252,55	251,73	251,80	251,44	250,70	251,47	252,26	251,98	252,26	252,75	252,99	252,41	252,29	251,96	251,80	251,50	251,59	251,94	252,99	250,70	2,29	0,91%
13	251,44	251,44	251,84	251,84	252,51	251,68	251,56	251,62	252,05	251,75	251,84	251,07	252,55	251,60	251,74	251,41	250,56	251,15	252,29	251,87	252,32	252,91	252,91	252,15	252,21	252,04	252,21	251,45	251,64	251,43	251,34	251,81	252,91	250,56	2,35	0,93%	
14	251,28	251,28	252,18	252,18	252,22	251,79	251,81	252,06	251,69	251,52	251,36	252,28	251,88	251,69	251,52	251,00	251,51	251,04	251,92	252,60	252,64	252,63	252,64	252,06	252,21	251,85	251,50	251,79	251,24	251,62	251,88	252,64	251,00	1,64	0,65%		
15	251,37	251,37	252,02	252,02	252,40	252,20	251,98	252,03	251,86	251,92	251,19	251,27	251,99	252,30	251,16	250,77	251,56	251,24	252,32	252,32	252,64	252,81	252,80	252,14	251,90	252,33	252,33	251,50	251,56	251,08	251,25	251,87	252,80	250,77	2,03	0,81%	

Tabela 5 – Sensor de temperatura (técnica 1)

Aberturas	Sensor de Temperatura																														Média	Maior valor	Menor valor	Variação	% Variação da média
	Medições																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
1	22,67	22,11	22,11	21,98	21,96	22,10	21,87	21,74	21,71	21,80	21,54	21,85	21,72	21,56	21,47	21,52	21,33	21,36	21,41	21,32	21,35	21,44	21,40	21,81	21,89	21,56	22,23	22,02	22,24	22,74	21,75	22,74	21,32	1,42	6,51%
2	22,64	22,08	22,08	21,95	21,93	22,08	21,85	21,69	21,65	21,78	21,49	21,83	21,69	21,51	21,47	21,48	21,29	21,35	21,37	21,27	21,32	21,43	21,34	21,79	21,84	21,51	22,18	21,99	22,23	22,77	21,72	22,77	21,27	1,50	6,91%
3	22,61	22,05	22,07	21,93	21,93	22,10	21,85	21,67	21,65	21,80	21,44	21,82	21,66	21,52	21,46	21,48	21,26	21,38	21,36	21,25	21,31	21,45	21,27	21,74	21,75	21,48	22,15	21,95	22,22	22,83	21,71	22,83	21,25	1,57	7,25%
4	22,62	22,03	22,07	21,94	21,96	22,17	21,85	21,68	21,62	21,79	21,44	21,85	21,68	21,51	21,49	21,42	21,25	21,42	21,31	21,24	21,31	21,42	21,20	21,64	21,62	21,46	22,18	21,94	22,22	22,76	21,69	22,76	21,20	1,55	7,16%
5	22,62	22,09	22,07	21,95	22,04	22,22	21,89	21,70	21,62	21,81	21,45	21,86	21,73	21,53	21,51	21,43	21,26	21,49	21,36	21,23	21,38	21,34	21,22	21,49	21,47	21,50	22,18	21,97	22,22	22,67	21,70	22,67	21,22	1,45	6,68%
6	22,63	22,11	22,04	21,93	22,05	22,15	21,93	21,70	21,62	21,80	21,43	21,88	21,76	21,49	21,53	21,43	21,30	21,50	21,33	21,24	21,31	21,31	21,24	21,12	21,47	21,52	22,16	22,03	22,25	22,23	21,67	22,25	21,12	1,13	5,23%
7	22,63	22,16	22,00	21,89	22,07	21,99	21,95	21,77	21,64	21,82	21,48	21,84	21,77	21,56	21,52	21,39	21,28	21,48	21,36	21,22	21,25	21,26	21,24	21,06	21,47	21,54	22,19	22,00	22,24	22,20	21,66	22,24	21,06	1,18	5,45%
8	22,60	22,28	21,97	21,85	22,01	21,99	21,88	21,78	21,62	21,75	21,49	21,82	21,84	21,55	21,52	21,40	21,29	21,45	21,37	21,21	21,15	21,23	21,19	21,11	21,40	21,50	22,20	21,93	22,25	22,26	21,64	22,26	21,11	1,15	5,31%
9	22,56	22,35	21,94	21,85	21,91	21,90	21,87	21,75	21,64	21,73	21,50	21,76	21,89	21,51	21,44	21,40	21,30	21,36	21,31	21,19	21,13	21,21	21,21	21,08	21,38	21,47	22,18	21,94	22,18	22,37	21,62	22,37	21,08	1,29	5,95%
10	22,54	22,55	21,93	21,85	21,90	21,86	21,86	21,81	21,65	21,66	21,35	21,74	21,68	21,63	21,41	21,41	21,36	21,32	21,35	21,22	21,18	21,21	21,18	21,16	21,43	21,55	22,21	21,96	22,21	22,44	21,63	22,44	21,16	1,28	5,93%
11	22,53	22,75	21,94	21,87	21,91	21,85	21,87	21,85	21,73	21,66	21,37	21,76	21,67	21,64	21,44	21,46	21,43	21,27	21,46	21,24	21,28	21,18	21,20	21,14	21,48	21,55	22,28	22,02	22,23	22,49	21,65	22,49	21,14	1,35	6,24%
12	22,53	22,84	21,86	21,90	21,85	21,80	21,83	21,85	21,70	21,62	21,38	21,69	21,63	21,71	21,40	21,47	21,39	21,23	21,42	21,28	21,24	21,23	21,20	21,13	21,53	21,58	22,24	22,00	22,15	22,39	21,63	22,39	21,13	1,27	5,86%
13	22,49	22,78	21,76	21,88	21,76	21,74	21,88	21,91	21,59	21,57	21,27	21,60	21,66	21,77	21,35	21,55	21,39	21,15	21,36	21,23	21,19	21,20	21,19	21,10	21,63	21,64	22,11	21,91	22,06	22,11	21,59	22,11	21,10	1,01	4,68%
14	22,47	22,58	21,65	21,81	21,71	21,62	21,74	21,85	21,44	21,47	21,13	21,50	21,57	21,89	21,20	21,52	21,27	21,04	21,16	21,26	21,06	21,10	21,12	21,12	21,67	21,70	22,09	21,81	21,89	22,00	21,51	22,09	21,04	1,05	4,88%
15	22,50	22,62	21,61	21,81	21,79	21,62	21,79	21,92	21,43	21,44	21,14	21,48	21,53	21,94	21,18	21,48	21,21	20,99	21,09	21,09	21,00	21,04	21,12	21,18	21,70	21,84	21,94	21,72	21,80	21,95	21,49	21,95	20,99	0,96	4,45%

Tabela 6 – Rotação bomba de ar (técnica 1)

Aberturas	Rotação bomba de ar																														Média	Maior valor	Menor valor	Variação	% Variação da média
	Medições																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
1	1572	1558	1580	1557	1560	1557	1561	1559	1564	1559	1563	1559	1558	1564	1560	1566	1568	1570	1570	1597	1596	1597	1606	1604	1566	1598	1582	1599	1612	1546	1574,75	1612,23	1546,05	66,18	4,20%
2	2761	2762	2765	2767	2768	2767	2770	2763	2767	2762	2759	2763	2772	2758	2764	2765	2770	2777	2770	2775	2778	2777	2775	2771	2770	2779	2758	2769	2775	2761	2768,54	2778,70	2757,69	21,01	0,76%
3	3620	3614	3621	3628	3626	3629	3623	3622	3618	3619	3614	3627	3632	3615	3620	3623	3626	3628	3626	3631	3631	3630	3631	3629	3628	3634	3617	3629	3630	3622	3625,34	3633,95	3614,11	19,84	0,55%
4	4514	4519	4521	4522	4525	4525	4519	4519	4513	4518	4504	4522	4522	4517	4516	4517	4525	4527	4520	4538	4537	4534	4537	4525	4531	4540	4528	4535	4534	4517	4524,93	4539,52	4503,94	35,58	0,79%
5	5372	5376	5381	5385	5382	5378	5375	5379	5365	5374	5426	5372	5374	5373	5363	5377	5377	5383	5382	5389	5384	5382	5378	5373	5385	5394	5389	5389	5387	5368	5380,76	5425,92	5363,06	62,86	1,17%
6	6290	6297	6284	6283	6281	6283	6280	6287	6277	6281	6297	6281	6291	6278	6284	6293	6290	6288	6281	6291	6291	6276	6291	6283	6289	6301	6307	6302	6302	6289	6288,28	6306,74	6276,15	30,59	0,49%
7	6965	6988	6994	6993	6998	6987	6983	6989	6978	6978	6963	6978	6981	6954	6973	6977	6988	7003	7003	7009	7021	7009	7005	7006	7009	7009	6994	6986	6979	6995	6990,64	7020,99	6954,29	66,70	0,95%
8	7448	7479	7466	7472	7474	7474	7449	7478	7476	7456	7458	7459	7484	7463	7462	7470	7483	7478	7488	7518	7508	7496	7500	7496	7484	7507	7487	7483	7480	7485	7480,59	7518,28	7449,14	69,14	0,92%
9	7795	7824	7826	7804	7817	7799	7796	7813	7827	7795	7805	7805	7818	7805	7794	7797	7826	7815	7831	7843	7843	7846	7849	7836	7844	7836	7825	7817	7823	7828	7820,49	7848,95	7794,00	54,95	0,70%
10	8067	8104	8098	8105	8096	8072	8067	8083	8089	8075	8072	8071	8080	8091	8062	8071	8091	8083	8098	8109	8129	8107	8105	8112	8110	8097	8093	8096	8089	8090	8089,93	8129,18	8062,03	67,15	0,83%
11	8279	8315	8280	8316	8284	8288	8278	8296	8292	8272	8279	8289	8299	8303	8275	8276	8271	8292	8299	8324	8314	8318	8313	8312	8321	8317	8295	8306	8292	8302	8296,36	8324,21	8270,53	53,68	0,65%
12	8493	8524	8503	8515	8516	8500	8500	8526	8507	8500	8481	8512	8515	8514	8494	8493	8498	8511	8514	8509	8520	8531	8525	8525	8530	8534	8509	8514	8509	8508	8511,25	8533,59	8481,46	52,13	0,61%
13	8682	8688	8698	8703	8702	8697	8690	8701	8692	8701	8683	8698	8699	8701	8686	8683	8691	8698	8695	8715	8710	8714	8708	8708	8703	8710	8699	8717	8702	8697	8699,94	8716,51	8682,61	33,90	0,39%
14	8709	8757	8745	8763	8755	8734	8746	8743	8720	8742	8708	8747	8720	8755	8719	8700	8711	8724	8744	8728	8744	8742	8749	8755	8737	8766	8732	8727	8758	8743	8736,46	8766,32	8700,39	65,94	0,75%
15	8871	8881	8874	8877	8877	8875	8869	8883	8871	8881	8855	8880	8870	8886	8852	8844	8861	8872	8881	8879	8891	8892	8882	8875	8879	8886	8874	8879	8884	8874	8874,63	8891,63	8844,47	47,16	0,53%

Os valores do sensor de distância para as 15 aberturas de válvulas, a porcentagem de variação foi calculada supondo uma variação de 10% do maior intervalo possível a ser medido, portanto 10% de 5 milímetros, assim obtendo um valor percentual de referência. Como era de se esperar, o percentual de referência aumenta conforme a abertura da válvula, visto que, a turbulência do fluxo de ar é maior, causando uma maior movimentação da colmeia.

Os valores de pressão tiveram uma variação média de 1%, os valores de temperatura tiveram uma variação média de 5,9% e os valores de rotação tiveram uma variação média de 0,95%, portanto, se mantiveram relativamente constantes, reforçando a conclusão que o foco dos estudos de capacidade devem estar baseados no medidor de torque que variou na média em 13%.

Com base nos dados obtidos foi calculado os valores de número de *Swirl* apresentados na tabela 7 e o histograma com a curva da distribuição normal (FDM) no gráfico 24, demonstrando que os valores obtidos se têm um grande enviesamento, porém com uma boa precisão.

Tabela 7 – Valores das medições MSA - técnica 1

Medição	Número de <i>Swirl</i>
1	1,972966009
2	1,979654956
3	1,977395039
4	1,969851864
5	1,980404956
6	1,990653489
7	1,976390362
8	1,976613085
9	1,971047149
10	1,981648504
11	1,983916464
12	1,983680500
13	1,979764997
14	1,968737150
15	1,995778985
16	1,978288110
17	1,988123076
18	1,991957447
19	1,982243281
20	1,982694485
21	1,984742191
22	1,978989033
23	1,975259268
24	1,972349978
25	1,974400326
26	1,974142322
27	1,988971586
28	1,986100653
29	1,977269780
30	1,983097501

Gráfico 24 - Histograma da curva distribuição normal do número de *Swirl* – técnica 1

Com os valores do número de *Swirl* da tabela 9, foi calculada a média aritmética ($\bar{X}$), desvios padrão (σ), desvio padrão relativo, que é a divisão do desvio padrão pela média aritmética, o C_g e C_{gk} sendo apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Índice de C_g e C_{gk}

Valor médio $\bar{X}$	1,9802378
Desvio padrão σ	0,0067
Desvio padrão relativo	0,0034
Valor de referência N	2,1
Tolerância T	0,4
LCL	2,5
UCL	1,7
Cálculo C_g e C_{gk}	
$BI = \bar{X} - N$	-0,119762248
$C_{gk} = (0,1 \times T - BI) / (2 \times \sigma)$	3,86
$C_g = (0,2 \times T) / (4 \times \sigma)$	2,97

Valores de C_g igual a 3,86 e C_{gk} igual a 2,97 estão acima de 1,33, sendo assim o equipamento de medição foi aprovado e possibilitando o avanço para a técnica 3.

4.1.3. Resultados da técnica 3

Para a técnica 3, foram realizadas medições em 10 diferentes cabeçotes, por um mesmo operador, repetindo as medições em cada cabeçote por 3 vezes, isto é, 30 medições. Foram mantidas as condições de operação, isto é, a 22°C, com a abertura de válvulas em 15 posições, abrindo em um milímetro entre cada posição, partindo da posição totalmente aberta. Para estabilização do fluxo e velocidade do ar, foi mantido um tempo de estabilização de 15 segundos e posteriormente um sistema de controle coleta 1500 dados de: deslocamento do braço de medição, pressão, temperatura e rotação.

Para cada medição foram obtidos os dados apresentados nas tabelas 9, 10, 11 e 12:

Tabela 9 – Sensor de distância (técnica 3)

Aberturas	Sensor de Deslocamento																														Média	Maior valor	Menor valor	Variação	% Variação (10% de variação tolerável)
	Medições																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
1	0,0253	0,0182	0,0172	0,0316	0,0318	0,0326	0,0449	0,0449	0,0440	0,0267	0,0295	0,0313	0,0361	0,0364	0,0349	0,0379	0,0425	0,0420	0,0442	0,0439	0,0457	0,0390	0,0393	0,0372	0,0331	0,0334	0,0340	0,0235	0,0371	0,0235	0,0347	0,0457	0,0172	0,0284	6%
2	0,1027	0,0941	0,0956	0,0839	0,0849	0,1047	0,1167	0,1127	0,1131	0,0718	0,0738	0,0715	0,1018	0,1066	0,1045	0,0958	0,0928	0,0975	0,1139	0,1157	0,1165	0,0969	0,0976	0,0955	0,0474	0,0747	0,0468	0,1065	0,1060	0,1087	0,0950	0,1167	0,0468	0,0698	14%
3	0,1549	0,1416	0,1419	0,0878	0,0911	0,1246	0,1630	0,1662	0,1646	0,0990	0,0844	0,0632	0,1540	0,1536	0,1533	0,1388	0,1378	0,1356	0,1540	0,1565	0,1591	0,1391	0,1426	0,1391	0,0930	0,0957	0,0963	0,1528	0,1129	0,1311	0,1309	0,1662	0,0632	0,1031	21%
4	0,2354	0,2256	0,2272	0,2077	0,1978	0,2077	0,2319	0,2295	0,2332	0,1735	0,1793	0,1791	0,2283	0,2241	0,2248	0,1800	0,2063	0,2007	0,2276	0,2321	0,2262	0,2051	0,2126	0,2068	0,2111	0,2185	0,2146	0,2021	0,1607	0,2055	0,2105	0,2354	0,1607	0,0747	15%
5	0,3690	0,3648	0,3617	0,3650	0,3634	0,3580	0,3826	0,3790	0,3763	0,3302	0,3364	0,3311	0,3996	0,4001	0,3933	0,3678	0,3631	0,3621	0,3887	0,3896	0,3904	0,3497	0,3462	0,3426	0,3579	0,3600	0,3604	0,3646	0,3656	0,3672	0,3662	0,4001	0,3302	0,0699	14%
6	0,5941	0,5976	0,5916	0,6023	0,6200	0,6162	0,6170	0,6197	0,6289	0,5730	0,5635	0,5715	0,6490	0,6461	0,6465	0,5706	0,5698	0,5859	0,6004	0,6043	0,6099	0,5426	0,5376	0,5383	0,5662	0,5629	0,5688	0,6415	0,6392	0,6169	0,5964	0,6490	0,5376	0,1114	22%
7	0,8903	0,8981	0,8779	0,9742	0,9810	0,9658	0,9436	0,9168	0,9307	0,8636	0,8627	0,8787	0,9494	0,9529	0,9392	0,8642	0,8585	0,9601	1,0086	1,0189	0,9913	0,8746	0,8647	0,8778	0,8993	0,9348	0,9364	1,0185	1,0181	1,0107	0,9320	1,0189	0,8585	0,1604	32%
8	1,2401	1,2362	1,2721	1,3482	1,3294	1,3978	1,3794	1,3754	1,3354	1,3441	1,3412	1,3292	1,4097	1,3802	1,4020	1,2896	1,3128	1,4236	1,5103	1,4822	1,4995	1,3515	1,3893	1,3538	1,3846	1,3714	1,3846	1,5080	1,4808	1,5010	1,3788	1,5103	1,2362	0,2741	55%
9	1,6135	1,5989	1,5546	1,7589	1,7940	1,7716	1,7953	1,8602	1,8279	1,7277	1,7379	1,7415	1,7651	1,8101	1,8165	1,6648	1,7005	1,7606	1,8713	1,8310	1,8459	1,8174	1,7926	1,8192	1,7819	1,8222	1,7680	1,9352	1,9072	1,8856	1,7792	1,9352	1,5546	0,3807	76%
10	2,0283	2,0026	1,9283	2,1165	2,1322	2,1125	2,1050	2,1305	2,0972	2,0705	2,0205	2,0529	2,0987	2,1164	2,0749	1,9285	1,9362	1,9569	2,2214	2,1709	2,1408	2,0311	2,0757	2,1095	2,0766	2,0948	2,1189	2,2163	2,2016	2,2255	2,0864	2,2255	1,9283	0,2972	59%
11	2,3084	2,2898	2,2094	2,4081	2,4101	2,3737	2,3341	2,4498	2,3599	2,3122	2,3316	2,3472	2,3877	2,3854	2,3621	2,2215	2,2099	2,2082	2,4390	2,4479	2,4552	2,3681	2,4058	2,3476	2,3363	2,4168	2,3975	2,5384	2,5320	2,5146	2,3703	2,5384	2,2082	0,3302	66%
12	2,5494	2,5427	2,5573	2,6506	2,6341	2,6509	2,5774	2,6546	2,6549	2,5326	2,5642	2,5567	2,6232	2,6650	2,6248	2,4884	2,4173	2,4533	2,6403	2,7164	2,6829	2,5508	2,6042	2,5812	2,6374	2,6245	2,5925	2,7698	2,7746	2,7408	2,6104	2,7746	2,4173	0,3573	71%
13	2,7438	2,7281	2,7405	2,7799	2,7367	2,7982	2,7927	2,8105	2,8125	2,6937	2,7029	2,7073	2,7895	2,7886	2,7756	2,6525	2,5859	2,5813	2,8372	2,8793	2,8429	2,7686	2,7710	2,7620	2,7931	2,8329	2,7601	2,9314	2,9497	2,8987	2,7749	2,9497	2,5813	0,3684	74%
14	2,9828	2,9829	2,9932	2,9720	2,9966	2,9570	2,9835	3,0867	3,0642	2,8958	2,9334	2,9421	3,0497	2,9706	3,0260	2,8080	2,8110	2,8057	3,0061	3,0257	3,0203	2,9701	2,9777	3,0617	3,0029	2,9885	2,9722	3,1386	3,1010	3,0857	2,9867	3,1386	2,8057	0,3329	67%
15	3,3765	3,3687	3,3510	3,2718	3,2761	3,2777	3,3207	3,3309	3,2949	3,1889	3,2556	3,2581	3,3410	3,3103	3,3376	3,0683	3,1073	3,0547	3,3081	3,3250	3,3137	3,3019	3,2812	3,3259	3,3365	3,3517	3,3564	3,4807	3,4075	3,4154	3,2998	3,4807	3,0547	0,4259	85%

Tabela 10 – Sensor de pressão (técnica 3)

Aberturas	Sensor de pressão																														Média	Maior valor	Menor valor	Variação	% Variação da média		
	Medições																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30							
1	254,00	254,00	253,53	253,53	253,73	254,24	255,23	255,43	254,61	253,20	253,99	253,81	253,35	253,60	252,41	253,79	253,75	254,62	253,51	254,62	255,33	255,39	255,11	254,45	254,60	255,33	254,26	254,74	254,65	254,75	254,25	255,43	252,41	3,02	1,19%		
2	250,54	250,54	250,30	250,30	250,52	250,43	250,99	251,01	251,16	250,07	250,55	250,64	250,70	250,65	250,53	250,62	250,62	251,06	250,31	250,13	251,25	251,59	251,71	250,32	250,08	250,09	251,15	249,90	249,61	249,73	250,57	251,71	249,61	2,10	0,84%		
3	249,14	249,14	248,81	248,81	249,39	249,85	250,14	249,97	249,92	249,42	249,46	249,77	249,19	249,51	249,44	249,32	248,78	249,78	248,78	249,05	249,11	249,98	250,03	249,63	249,72	250,04	249,29	248,93	248,77	248,92	249,40	250,14	248,77	1,37	0,55%		
4	249,04	249,04	248,76	248,76	248,56	249,10	249,41	249,63	249,29	248,77	248,87	248,98	248,51	249,03	248,89	248,72	247,79	249,15	248,55	248,94	249,25	249,64	249,61	249,26	248,94	249,25	248,71	248,53	248,29	248,07	248,91	249,64	247,79	1,85	0,74%		
5	248,20	248,20	248,06	248,06	247,80	248,24	247,82	247,87	249,07	248,44	248,22	248,30	248,11	248,34	248,24	248,16	247,27	248,46	247,96	248,00	249,18	249,07	248,60	249,05	249,12	248,27	248,03	247,64	247,57	247,37	248,22	249,18	247,27	1,91	0,77%		
6	252,74	252,74	252,98	252,98	252,97	253,02	251,30	250,14	251,46	252,87	252,64	252,99	252,86	252,56	251,66	252,35	250,48	250,97	250,94	250,86	252,12	251,56	250,30	251,65	250,96	249,61	249,63	250,58	251,15	250,52	251,65	253,02	249,61	3,41	1,36%		
7	252,18	252,18	251,38	251,38	252,04	252,35	254,21	254,16	254,29	251,17	252,46	252,33	252,37	252,70	252,47	252,54	253,09	252,88	253,47	253,35	254,63	254,64	255,29	254,61	254,00	254,77	254,29	253,02	252,00	252,42	253,09	255,29	251,17	4,12	1,63%		
8	251,16	251,16	250,52	250,52	250,70	251,44	252,01	250,96	252,00	250,34	251,12	250,92	251,53	251,27	251,22	250,52	250,37	251,04	252,23	252,68	252,17	253,54	252,72	252,09	251,72	251,32	251,91	250,22	250,43	251,38	253,54	250,22	3,32	1,32%			
9	250,51	250,51	250,31	250,31	250,34	250,82	250,87	250,56	251,35	250,22	250,80	250,71	250,62	251,01	250,16	250,64	250,25	250,92	250,31	251,63	251,94	251,88	252,01	251,85	250,45	252,09	250,69	250,06	250,05	250,22	250,80	252,09	250,05	2,04	0,81%		
10	250,84	250,84	249,79	249,79	250,12	250,84	251,06	250,26	250,25	250,24	250,68	251,19	250,76	250,68	250,12	250,16	249,52	250,64	251,65	251,33	250,59	251,55	251,49	251,59	250,38	250,58	250,36	249,84	248,50	250,09	250,52	251,65	248,50	3,15	1,26%		
11	250,48	250,48	250,16	250,16	250,19	250,74	250,14	251,10	250,51	250,12	250,69	250,54	250,38	250,64	250,80	250,58	250,62	249,61	250,64	251,35	250,86	251,21	250,92	251,54	250,44	250,50	250,28	249,91	249,97	249,32	250,50	251,54	249,32	2,22	0,89%		
12	251,10	251,10	250,32	250,32	250,74	250,55	251,17	251,16	250,59	250,84	251,15	250,95	250,74	250,30	250,69	249,91	251,05	249,56	251,47	250,93	251,05	249,56	251,47	250,93	251,00	251,45	251,85	251,12	250,39	250,85	250,42	250,06	249,98	250,72	251,85	2,29	0,91%
13	250,82	250,82	250,53	250,53	250,45	250,22	251,06	251,10	250,81	250,81	250,78	251,15	250,95	250,96	250,80	250,81	251,04	250,08	250,00	251,27	251,94	251,12	250,81	251,58	251,22	250,59	250,88	250,83	250,28	250,46	250,72	250,89	251,94	250,00	1,94	0,77%	
14	251,05	251,05	250,64	250,64	250,22	250,57	250,98	251,35	250,63	250,61	250,92	251,17	250,83	250,68	250,69	251,17	251,16	250,61	250,53	251,56	250,80	251,48	251,66	251,38	250,38	250,47	250,73	250,38	249,93	250,79	250,83	251,66	249,93	1,73	0,69%		
15	250,01	251,00	250,87	250,87	250,48	250,44	251,37	251,48	250,71	250,91	251,10	251,35	250,99	250,47	250,92	251,01	251,48	250,77	250,59	250,59	251,01	252,09	251,78	251,22	250,55	250,81	250,74	250,58	250,85	250,52	250,96	252,09	250,44	1,65	0,66%		

Tabela 11 – Sensor de temperatura (técnica 3)

Aberturas	Sensor de Temperatura																														Média	Maior valor	Menor valor	Variação	% Variação da média
	Medições																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
1	22,76	22,77	22,58	22,38	22,34	22,20	22,16	21,96	21,91	21,77	21,56	21,46	21,54	21,50	21,44	21,55	21,54	21,68	21,58	21,45	21,35	21,37	21,93	21,38	21,27	21,04	20,98	21,63	21,69	21,14	21,66	22,58	20,98	1,60	7,37%
2	22,68	22,71	22,55	22,33	22,29	22,15	22,08	21,91	21,87	21,73	21,51	21,42	21,49	21,45	21,40	21,52	21,47	21,65	21,52	21,39	21,29	21,31	21,89	21,33	21,20	20,99	20,93	21,60	21,66	21,09	21,61	22,55	20,93	1,62	7,47%
3	22,65	22,70	22,52	22,30	22,25	22,11	22,09	21,89	21,84	21,75	21,49	21,37	21,49	21,43	21,35	21,50	21,46	21,68	21,50	21,38	21,24	21,29	21,82	21,30	21,15	20,95	20,92	21,60	21,63	21,09	21,59	22,52	20,92	1,60	7,41%
4	22,64	22,71	22,51	22,27	22,22	22,11	22,06	21,88	21,81	21,76	21,48	21,37	21,43	21,41	21,34	21,50	21,46	21,79	21,47	21,38	21,27	21,26	21,64	21,35	21,17	20,94	20,90	21,62	21,59	21,08	21,58	22,51	20,90	1,61	7,46%
5	22,65	22,73	22,50	22,28	22,22	22,11	22,05	21,90	21,86	21,76	21,47	21,37	21,42	21,41	21,37	21,50	21,48	21,81	21,47	21,35	21,26	21,24	21,55	21,39	21,18	20,96	20,93	21,62	21,65	21,06	21,58	22,50	20,93	1,57	7,27%
6	22,73	22,80	22,49	22,27	22,15	22,12	22,07	21,91	21,87	21,78	21,48	21,37	21,44	21,46	21,40	21,52	21,50	21,78	21,51	21,37	21,28	21,27	21,48	21,51	21,20	20,98	20,97	21,61	21,68	21,12	21,59	22,49	20,97	1,52	7,05%
7	22,80	22,92	22,52	22,30	22,14	22,13	22,07	21,89	21,87	21,83	21,50	21,37	21,43	21,48	21,41	21,54	21,52	21,68	21,52	21,38	21,30	21,32	21,25	21,70	21,23	21,01	20,99	21,69	21,78	21,19	21,61	22,52	20,99	1,53	7,08%
8	22,83	23,08	22,57	22,30	22,13	22,11	22,09	21,86	21,83	21,88	21,52	21,40	21,48	21,49	21,41	21,55	21,53	21,47	21,57	21,41	21,33	21,34	21,22	21,85	21,24	21,07	21,02	21,66	21,79	21,20	21,62	22,57	21,02	1,54	7,14%
9	22,87	23,08	22,59	22,30	22,11	22,12	22,10	21,86	21,82	21,95	21,53	21,40	21,47	21,49	21,40	21,57	21,50	21,40	21,54	21,41	21,42	21,33	21,21	21,89	21,26	21,07	20,99	21,67	21,78	21,35	21,63	22,59	20,99	1,60	7,39%
10	22,91	23,00	22,60	22,29	22,12	22,10	22,09	21,85	21,82	22,01	21,54	21,42	21,47	21,49	21,37	21,55	21,47	21,45	21,55	21,36	21,52	21,34	21,20	21,92	21,26	21,06	20,94	21,67	21,78	21,33	21,63	22,60	20,94	1,66	7,67%
11	22,96	22,89	22,62	22,32	22,11	22,13	22,11	21,86	21,79	22,02	21,57	21,41	21,48	21,48	21,39	21,60	21,46	21,50	21,56	21,39	21,37	21,32	21,20	22,01	21,27	21,05	20,92	21,69	21,79	21,38	21,64	22,62	20,92	1,70	7,88%
12	23,05	22,77	22,65	22,36	22,11	22,13	22,08	21,87	21,77	22,10	21,54	21,41	21,44	21,48	21,33	21,59	21,43	21,51	21,54	21,35	21,35	21,34	21,16	21,83	21,27	21,02	20,89	21,69	21,79	21,40	21,62	22,65	20,89	1,76	8,14%
13	23,16	22,75	22,74	22,38	22,08	22,12	22,09	21,86	21,74	22,19	21,52	21,38	21,45	21,45	21,30	21,53	21,37	21,45	21,53	21,31	21,26	21,34	21,13	21,74	21,29	20,99	20,83	21,61	21,76	21,43	21,60	22,74	20,83	1,91	8,86%
14	23,23	22,76	22,82	22,46	22,05	22,14	22,12	21,87	21,71	22,29	21,49	21,36	21,45	21,45	21,24	21,49	21,31	21,39	21,56	21,28	21,17	21,36	21,08	21,69	21,35	20,93	20,77	21,42	21,71	21,47	21,59	22,82	20,77	2,15	9,95%
15	23,39	22,87	23,07	22,69	22,15	22,23	22,21	22,08	21,81	22,46	21,58	21,29	21,52	21,49	21,31	21,64	21,35	21,39	21,65	21,36	21,23	21,46	21,05	21,75	21,50	20,91	20,80	21,33	21,60	21,59	21,66	23,07	20,80	2,28	10,51%

Tabela 12 – Rotação de bomba de ar (técnica 3)

Aberturas	Rotação bomba de ar																														Média	Maior valor	Menor valor	Variação	% Variação da média	
	Medições																																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30						
1	1569	1577	1589	1583	1589	1575	1551	1550	1543	1595	1594	1600	1619	1621	1591	1612	1615	1618	1631	1635	1609	1613	1607	1590	1590	1549	1565	1480	1493	1474	1581,09	1635,20	1474,07	161,13	10,19%	
2	2662	2672	2665	2715	2726	2667	2657	2656	2656	2725	2727	2731	2677	2677	2680	2691	2687	2689	2677	2671	2689	2680	2685	2685	2621	2665	2636	2613	2606	2607	2672,36	2730,82	2606,22	124,60	4,66%	
3	3479	3479	3480	3439	3457	3454	3459	3457	3455	3470	3465	3476	3465	3467	3468	3526	3520	3513	3476	3472	3482	3491	3492	3497	3410	3409	3417	3412	3408	3404	3462,34	3525,99	3404,02	121,97	3,52%	
4	4377	4371	4371	4307	4296	4309	4335	4334	4330	4339	4340	4346	4369	4362	4360	4420	4424	4435	4373	4375	4369	4374	4371	4373	4290	4290	4282	4283	4283	4279	4343,85	4434,81	4279,29	155,53	3,58%	
5	5274	5271	5269	5210	5203	5210	5228	5227	5236	5263	5261	5246	5266	5262	5261	5322	5309	5322	5280	5272	5291	5300	5288	5300	5200	5199	5182	5188	5183	5177	5249,13	5322,48	5176,90	145,58	2,77%	
6	6141	6127	6128	6124	6124	6116	6112	6089	6104	6147	6142	6138	6141	6137	6120	6136	6106	6117	6154	6145	6150	6151	6132	6152	6039	6010	6013	6049	6051	6041	6108,30	6153,70	6009,74	143,96	2,36%	
7	6844	6839	6829	6815	6791	6809	6858	6855	6855	6838	6838	6835	6823	6828	6838	6843	6843	6858	6876	6882	6883	6893	6902	6908	6796	6801	6787	6751	6731	6738	6833,11	6907,91	6730,95	176,95	2,59%	
8	7427	7437	7423	7306	7302	7311	7346	7341	7356	7346	7339	7352	7333	7340	7330	7359	7346	7362	7326	7357	7357	7415	7437	7432	7320	7308	7302	7223	7211	7199	7332,71	7437,41	7198,94	238,48	3,25%	
9	7889	7885	7882	7716	7695	7712	7732	7716	7727	7748	7755	7746	7692	7693	7686	7732	7729	7755	7744	7761	7763	7824	7812	7835	7681	7707	7685	7589	7600	7594	7719,81	7835,18	7589,30	245,88	3,19%	
10	8201	8205	8192	8072	8075	8087	8091	8079	8081	8132	8124	8130	8058	8055	8046	8096	8091	8118	8132	8134	8127	8171	8175	8188	8062	8056	8039	7990	7952	7974	8087,00	8187,55	7951,61	235,95	2,92%	
11	8529	8518	8525	8417	8405	8423	8406	8414	8406	8475	8470	8457	8395	8389	8393	8434	8423	8415	8461	8474	8459	8475	8474	8511	8401	8385	8380	8295	8303	8304	8416,41	8511,45	8295,29	216,17	2,57%	
12	8809	8817	8800	8702	8719	8718	8714	8709	8695	8770	8762	8760	8696	8695	8692	8709	8726	8695	8783	8749	8764	8784	8779	8785	8706	8697	8689	8609	8602	8605		8715,56	8784,93	8602,22	182,71	2,10%
13	9065	9050	9055	8961	8965	8960	8954	8957	8939	9033	9014	9022	8962	8951	8946	8968	8976	8958	9026	9028	9022	9020	9018	9025	8964	8959	8964	8864	8871	8872	8970,65	9033,43	8864,05	169,38	1,89%	
14	9185	9191	9196	9167	9149	9171	9170	9148	9139	9189	9188	9181	9145	9154	9131	9143	9156	9145	9203	9216	9194	9207	9205	9170	9167	9175	9172	9097	9100	9116	9162,82	9216,43	9097,24	119,20	1,30%	
15	9216	9234	9247	9252	9252	9233	9214	9236	9216	9234	9240	9242	9212	9212	9224	9200	9214	9210	9261	9259	9270	9247	9272	9228	9212	9203	9196	9125	9162	9182	9221,38	9271,72	9124,89	148,24	1,59%	

Os valores de pressão tiveram uma variação média de 0,96%, os valores de temperatura tiveram uma variação média de 7,91% e os valores de rotação tiveram uma variação média de 3,23%, portanto se mantiveram relativamente constantes.

O medidor de torque variou na média 45%, reforçando que os estudos de capacidade devem ser baseados neste componente.

Com base nos dados obtidos foram calculados os valores do número de *Swirl* apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Valores das medições MSA - técnica 3

Peça	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	
Medição 1	1,51426	1,5480	1,55384	1,4810	1,5730	1,45464	1,56375	1,51099	1,54739	1,67377	1,5420	$\bar{X}_1$
Medição 2	1,50415	1,54950	1,58862	1,4936	1,5613	1,44657	1,57072	1,5154	1,55595	1,65770	1,5443	$\bar{X}_2$
Medição 3	1,49873	1,54854	1,57543	1,4964	1,5678	1,45671	1,56502	1,53739	1,5431	1,64612	1,5435	$\bar{X}_3$
Média	1,50571	1,54871	1,57263	1,4904	1,5674	1,45264	1,56650	1,52127	1,5488	1,65920		
Amplitude	0,01552	0,00140	0,03477	0,0154	0,0116	0,01013	0,00697	0,02640	0,01284	0,02764		
Número de amostras		Repetições		Operadores								
n	10	r	3	k	1							
$\bar{\bar{X}}$	1,54333	$\bar{\bar{R}}$	0,0162	Rp	0,2065	$\bar{x}diff$	0,0022					

Com os valores de número de *Swirl* da tabela 13, o índice de repetibilidade e reprodutibilidade foram calculados nos seguintes métodos: método das amplitudes, método das médias e amplitudes e o método da análise da variância.

Os valores obtidos pelo método das amplitudes são apresentados na tabela 14:

Tabela 14 – Índice de GRR método das amplitudes

d_2	1,71573
$GRR = \bar{\bar{R}}/d_2$	0,00948874
$\%GRR=100 \times GRR/\sigma$	
GRR	17%

Com o valor de 17% de GRR o equipamento de medição está aprovado. Para aprovação este valor tem que ser menor ou igual a 20%.

Os valores obtidos pelo método das médias e amplitudes são apresentados na tabela 15:

Tabela 15 – Índice de GRR método das médias e amplitudes

Repetibilidade - Variação do equipamento (Ev)	
$EV = \bar{\bar{R}} \cdot K1$ EV	0,0096183
Reprodutibilidade - Variação do operador (AV)	
$AV = \sqrt{(\bar{X}_{diffx} \cdot K2)^2 - \left(\frac{EV^2}{n \cdot r}\right)}$ AV	0,0012847
Repetibilidade e Reprodutibilidade (GRR)	
$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2}$ GRR	0,0096183
Variação da amostra	
$PV = R_p \cdot K3$ PV	0,06498309
Variação Total	
$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2}$ TV	0,06569105
$\%EV = 100(EV/TV)$ %EV	14,6%
$\%AV = 100(AV/TV)$ %AV	0%
$\%GRR = 100(GRR/TV)$ %GRR	15%
$\%PV = 100(PV/TV)$ %PV	99%
$ndc = 1,41(PV/GRR)$ ndc	9,5

Com o valor de GRR 15% e ndc 9,5 o equipamento de medição está aprovado. Para aprovação este valor tem que ser menor ou igual a 20% e ndc maior que 5.

Os valores obtidos pelo método da análise da variância são apresentados na tabela 16:

Tabela 16 - Índice de GRR método da análise da variância

MQ_o	0	Operadores	Como não tem influência (mesmo operador) = 0	
MQ_p	0,009462	Amostras		
MQ_{pxo}	0	Amostras/ operadores	Como não tem influência (mesmo operador) = 0	
MQ_e	0,000095	Equipamento		
			%Variação total	%Contribuição total
$EV=6\sqrt{MQ_e}$				
EV=	0,0584947	%EV	17%	3%
$AV=6\sqrt{\frac{MQ_o - MQ_{pxo}}{n \cdot r}}$				
AV=	0	%AV	0%	0%
$IAP=6\sqrt{\frac{MQ_{pxo} - MQ_e}{r}}$				
IAP=	0,0337719	%IAP	10%	1%
$GRR=6\sqrt{EV^2 + AV^2 + IAP^2}$				
GRR=	0,0675439	%GRR	20%	4%
$PV=6\sqrt{\frac{MQ_o - MQ_{pxo}}{k \cdot r}}$				
PV=	0,3369792	%PV	98%	96%
$TV=\sqrt{GRR^2 + PV^2}$				
TV=	0,3436818			
$ndc=1,41(PV/Grr)$				
ndc=	7,0345440			

Com o valor de GRR 20% e ndc 7,0 o equipamento de medição está aprovado. Para aprovação este valor tem que ser menor ou igual a 20% e ndc maior que 5).

Valores MQ_p , MQ_o , MQ_{pxo} e MQ_e foram obtidos através do programa de computador Microsoft Excel®.

Com o equipamento aprovado nos índices de capacidade, foi iniciado os estudos de confiabilidade das medições obtidas no equipamento de medição de número de *Swirl*.

4.2. Cálculo da medida da confiabilidade MTTF

Para o cálculo da medida da confiabilidade MTTF do medidor do número de *Swirl* foram realizados testes de vida acelerado.

4.2.1. Fluxograma

A figura 9 contém um fluxograma das atividades a serem realizadas e parâmetros de teste definidos para verificar a confiabilidade do medidor de torque através de teste de vida acelerado baseado no fluxograma da figura 5:

Figura 9 – Fluxograma do estudo de caso para aplicação do estudo de confiabilidade

O objetivo do teste que foi realizado foi encontrar por quanto tempo a capacidade do equipamento de medição do número de *Swirl* será mantida, assim obtendo o tempo de manutenção.

A falha a ser observada com base nos resultados do FMEA e FTA, que será apresentado no próximo capítulo, é a perda do índice de Cg 1,33 das medições ao longo do período de utilização.

As condições de operação foram as mesmas utilizadas na operação do equipamento de medição do número de *Swirl*.

O tamanho da amostra foi de 10 medições a serem realizadas em 4 horas.

Foi definido a realização de testes de vida acelerados, a ser abordado no capítulo 4.2.3, com o método de aceleração sobrecarga, em nível de estresse constante em três níveis e variáveis de estresse temperatura.

4.2.2. FMEA e FTA

Foi elaborado um FMEA no medidor de torque para obter os potenciais modos de falha. Inicialmente o FMEA foi elaborado através dos desenhos obtido durante o desenvolvimento do projeto.

O procedimento utilizado foi dividir o medidor de torque em três partes, corpo na figura 10, calibração na figura 11 e medidor de torque figura 12:

Figura 10 – Partes equipamento de medição do número de *Swirl* – corpo

Figura 11 – Partes equipamento de medição do número de *Swirl* - calibração

Figura 12 – Partes equipamento de medição do número de *Swirl* – Medidor de

Os componentes de cada parte foram avaliados separadamente apontando seus modos de falha, causa e efeito. Elementos de fixação não foram avaliados.

Modos de Falha com RPN menor que 70 não foram consideradas como falhas em potencial.

A tabela 17 apresenta um resumo do FMEA classificado por índice de RPN.

Com base no FMEA uma árvore de falha (FTA) baseada no efeito/causa da falha com maior RPN é apresentado na figura 13.

Tabela 17 – Resultado FMEA

NPR	Conjunto	Componente	Função	Modo de Falha	Efeito	Causa
504	medidor de torque.	arame de tensionamento.	manter o eixo posicionado	não posicionar.	erro medição.	quebra devido fadiga.
360	medidor de torque.	arame de tensionamento.	manter o eixo tensionado.	não tencionar.	erro medição.	escoamento ou quebra devido fadiga.
432	medidor de torque.	arame de tensionamento.	manter o eixo posicionado e tensionado.	posicionar de forma incorreta; tencionar de forma incorreta.	erro medição.	erro de montagem; erro de calibração.
320	medidor de torque.	retificador de fluxo de ar superior.	transferir momento gerado pelo fluxo de ar ao eixo.	transferir de forma incorreta.	erro na medição.	entupimento devido sujidade no ar.
240	medidor de torque.	óleo de lubrificação.	lubrificação entre corpo e retificador de ar superior.	lubrificar de forma incorreta.	erro na medição.	sujidade no óleo.
240	corpo.	retificador de fluxo ar inferior.	retificar o fluxo de para o tambor.	retificar de forma de forma incorreta.	erro na medição.	entupimento devido sujidade no ar.
180	corpo.	espaçador axial.	apoio para esfera.	poiar de forma incorreta.	erro na medição.	desgaste prematuro por sujidade.
160	calibração.	bração de calibração.	transmitir momento gerado pelos pesos ao eixo.	interferência com o corpo.	erro na medição.	desvio de torque na montagem.
144	medidor de torque.	chapas de mola.	tencionar o arame.	tencionar parcialmente.	erro medição.	trinca por fadiga.
144	medidor de torque.	retificador de fluxo ar superior.	transferir momento gerado pelo fluxo e ar ao eixo.	transferir de forma incorreta.	erro medição.	quebra parcial das colmeias devido sujidade.
120	corpo, calibração e medidor de torque.	tampas, braço de calibração, placas do sensor de laser, sensor de distância, grampo dos arames lado rígido, grampo das chapas de mola, grampo dos arames lado móvel, presilhas dos arames no eixo e presilhas dos arames no eixo.	vedar contra vazamento, transmitir momento gerado pelos pesos ao eixo, possibilitar a fixação do sensor de laser, medir deslocamento do braço de medição, fixar os arames, fixar as chapas de mola, fixar os arames e chapas de mola, fixar arame no eixo e transmitir movimento de deslocamento do eixo.	vedar de forma incorreta, transmitir de forma incorreta, possibilitar fixação de forma incorreta, medir de forma incorreta, fixar de forma incorreta e Interferência com o corpo.	erro medição, erro na calibração e ruído durante a operação.	desvio de torque.
108	medidor de torque.	óleo de lubrificação.	lubrificação entre corpo e retificador de ar superior.	não lubrificar, lubrificar parcialmente e lubrificar de forma incorreta.	erro medição.	falta de óleo, quantidade de óleo fora do especificado e óleo fora da validade.
108	medidor de torque.	eixo.	transferir movimento do retificador de fluxo ao braço de medição e braço de calibração.	transferir de forma incorreta.	erro medição, erro na calibração.	erro de posicionamento no arame.
90	medidor de torque.	braço de medição.	transmitir movimento de deslocamento do eixo.	transmitir de forma incorreta.	erro medição.	sujidade na área de medição.
81	medidor de torque.	óleo de lubrificação.	lubrificação entre corpo e retificador de ar superior.	não lubrificar (travar retificador de fluxo de ar).	erro na medição.	excesso de sujidade.
80	medidor de torque.	sensor de distância.	medir deslocamento do braço de medição.	medir de forma incorreta.	erro na medição.	erro de calibração do sensor.
80	medidor de torque.	arame de tensionamento.	manter o eixo posicionado/tencionado.	posicionar/tencionar de forma incorreta.	erro na medição.	erro de especificação.
80	medidor de torque.	retificador de fluxo ar de superior.	transferir momento gerado pelo fluxo de ar ao eixo.	transferir de forma incorreta.	erro na medição.	erro dimensional nos furos da colmeia.
80	óleo de lubrificação.	lubrificação entre corpo e retificador de ar superior.	lubrificar de forma incorreta.	transferir de forma incorreta.	erro na medição.	erro de especificação do óleo.
72	medidor de torque.	chapas de mola.	tencionar o arame.	tencionar de forma incorreta.	erro na medição.	erro de posicionamento nos blocos de fixação.

Figura 13 – Árvore de falhas

Portanto, de acordo com o resultado do FMEA, o arame de posicionamento é o item com maior probabilidade de falha, sendo falha o erro de medição, não posicionando ou tencionando o eixo, causado devido à quebra ou escoamento devido a fadiga.

Com base no FMEA uma árvore de falha (FTA) foi elaborada avaliando a falha e suas possíveis causas, chegando à conclusão que a falta do plano de manutenção será a causa da falha a ser tratada neste estudo de caso. A falha operacional também deve ser tratada, porém esta deve ser contida com treinamento ou um sistema poka-yoke, portanto os planos para evitar essa causa da falha, não foram abordados neste estudo.

Um plano de manutenção para manter a capacidade e quando esta deverá ser realizada foi o resultado a ser atingido.

4.2.3. Testes de vida acelerado

Um teste de vida acelerado foi realizado com o objetivo de verificar quando será necessário a intervenção do operador e qual atividade será necessária para evitar a perda da função principal do equipamento de medição do número de *Swirl*, isto é, perda da capacidade, visto que não há modos de falhas potenciais de quebra dos componentes devido a sua rigidez garantida durante o projeto. Portanto, a falha ser perseguida durante todo o teste foi: perda do índice de capacidade Cg de 1,33.

Testes iniciais foram realizados para determinar a quantidade de medições necessárias para que o equipamento de medição do número de *Swirl* perca sua capacidade, comprovando o valor estimado no fluxograma de 10 medições, ou seja, 4 horas.

O planejamento dos testes iniciais seria a realização das medições aquecendo a sala do laboratório a 40°C, realizando medições consecutivas e anotando os valores do número de *Swirl* até que o valor de Cg seja inferior a 1,33.

O valor de 40°C foi determinado devido ao sensor de distância IL-030 da Keyence ter como sua temperatura máxima de trabalho 50°C (Anexo A). Lembrando que esta temperatura é medida no tambor para retificação do fluxo de ar, contudo não sendo a

temperatura exata do ambiente onde o sensor de distância está montado, portanto a temperatura de operação do sensor durante os testes é possivelmente inferior.

Após isto, seria realizado uma sequência de 30 medições a 22°C para verificar se realmente a capacidade foi perdida. Com isto, seria conhecido qual o número necessário de medições a 40°C para perda do índice de capacidade Cg de 1,33.

Após isto, o arame seria trocado e efetuado a calibração do medidor de *Swirl*.

Com esta informação poderíamos dar início a uma sequência de 10 testes amostrais nas temperaturas de 40°C, 45°C e 50°C obtendo o número de medições necessária para falha ocorrer (tempos de falha).

Conforme planejado foram realizados testes iniciais com 10 medições a temperatura de 37°C, porém devido às dificuldades de obtenção da estabilidade térmica no laboratório utilizado, tempos de falha satisfatório não foram obtidos, porém com os testes iniciais os valores de Cg diminuíram de 2,97 para 1,67, demonstrando uma tendência de perda da capacidade do equipamento de medição do número de *Swirl*. Mais testes não foram realizados devido a dificuldades de obter a temperatura necessária. Portanto, com base nos poucos testes realizados, tempos de falha foram estimados no exemplo a seguir conforme as tabelas 18, 19 e 20, ou seja, número de medições necessárias para perda do índice de Cg nas três temperaturas e os cálculos necessários para se determinar a medida da confiabilidade MTTF, assim obtendo um tempo médio necessário para uma intervenção de manutenção sem perda da qualidade de medição, verificando o procedimento proposto.

Tabela 18 – Exemplo dos tempos de falhas a 40°C

Teste amostral	Número de medições necessárias para falha ocorrer
1	50
2	62
3	57
4	61
5	55
6	68
7	53
8	62
9	59
10	70

Tabela 19 – Exemplo dos tempos de falhas a 45°C

1	45
2	52
3	47
4	40
5	48
6	43
7	39
8	52
9	50
10	47

Tabela 20 – Exemplo dos tempos de falhas a 50°C

1	35
2	39
3	42
4	45
5	38
6	35
7	40

8	33
9	37
10	34

Com base nos dados estimados o maior tempo de falha para perda do número de Cg de 1,33, foi de 70 medições. Com isto, podemos definir como tempo total do teste de vida acelerado em 700 medições, isto é, 70 medições para cada amostra de um total de 10 amostras, demonstrando que a estimativa do planejamento dos testes estava incorreta.

A seguir será verificado a qualidade dos tempos de falha e qual modelo probabilístico representa melhor os tempos de falha estimados.

4.2.3.1. Análise dos tempos de falha

Com base nos dados obtidos foi calculado a função confiabilidade com o estimador não paramétrico de Kaplan-Meier (Km) utilizando a equação 63. Os resultados são apresentados na tabela 21.

$$\hat{R}(t) = \left(\frac{nfc_1 - d_1}{nfc_1} \right) \left(\frac{nfc_2 - d_2}{nfc_2} \right) \dots \left(\frac{nfc_i - d_i}{nfc_i} \right) \quad (69)$$

Tabela 21 – Função de confiabilidade estimada de Kaplan-Meier

	Número de medições necessária para falha ocorrer			RKm(m)
Teste Amostral	40	45	50	
0	0	0	0	1
1	50	39	33	0,9
2	53	40	34	0,8
3	55	43	35	0,7
4	57	45	35	0,6
5	59	47	37	0,5
6	61	47	38	0,4

7	62	48	39	0,3
8	62	50	40	0,2
9	68	52	42	0,1
10	70	52	45	0

O gráfico 25 representa a função confiabilidade do estimador não paramétrico de Kaplan-Meier:

Gráfico 25 - Função da confiabilidade estimada de Kaplan-Meier

Foi utilizado o método 2 (COLOSIMO; FREITAS, 1997) das técnicas gráficas construindo os gráficos 26 e 27 de linearização $\ln(-\ln(\hat{R}_{Km}(t)))$ vs. $\ln(t)$ e quantil da distribuição normal $\times \ln(t)$ respectivamente das funções confiabilidade utilizando o estimador de Kaplan-Meier para as 3 temperaturas obtendo a primeira estimativa da adequação do modelo e a distribuição candidata a representar os tempos de falha.

Gráfico 26 - Linearização da função confiabilidade Kaplan-Meier $\text{Ln}(-\text{Ln}(K_m)) \times \text{Ln}(t)$ Gráfico 27 – Quantil da distribuição normal x $\text{Ln}(t)$

Devido ao paralelismo das retas no gráfico 26 podemos supor que estamos diante do modelo exponencial ou Weibull, ao contrário do gráfico 27, onde os pontos não representam uma reta, porém esta estimativa ainda não é conclusiva. Portanto o próximo passo é o ajuste do modelo de regressão para todos os níveis de estresse através do modelo da equação 118:

$$Y = \ln(T) = \beta_0 + \beta_1 X + \sigma \varepsilon \quad (118)$$

Através do software de probabilidade Minitab17® foi calculado os parâmetros dos modelos de regressão exponencial ($\widehat{\beta}_1$ e $\widehat{\beta}_0$), Weibull ($\widehat{\beta}_1$, $\widehat{\beta}_0$ e $\widehat{\sigma}$) e lognormal ($\widehat{\beta}_1$, $\widehat{\beta}_0$ e $\widehat{\sigma}$) para relação de Arrhenius:

Portanto:

Exponencial:

$$\widehat{\beta}_1 = -10,69$$

$$\widehat{\beta}_0 = 0,3989$$

$$\widehat{\sigma} = 1$$

Portanto t tem distribuição exponencial com α :

$$\widehat{\alpha}_i = \exp(-10,69 + 0,3989 \cdot X_i)$$

Weibull:

$$\widehat{\beta}_1 = -10,65$$

$$\widehat{\beta}_0 = 0,3987$$

$$\widehat{\sigma} = 11$$

$$\widehat{\sigma} = \frac{1}{\widehat{\delta}} = 0,909$$

Portanto t tem distribuição Weibull com α :

$$\widehat{\alpha}_i = \exp(-10,65 + 0,3987 \cdot X_i)$$

lognormal

$$\widehat{\beta}_1 = -10,68$$

$$\widehat{\beta}_0 = 0,3982$$

$$\hat{\sigma}=0.0969$$

Portanto $\text{Ln}(t)$ tem distribuição normal com média:

$$\hat{\mu}_i(t)=(-10,68+0,3982.X_i)$$

Nas condições acima, em Kelvin, temos pela equação 125, os valores de X_i para cada temperatura, sendo 40, 45 e 50 graus Celsius:

$$X_i = \frac{11604,83}{T+273,16} \quad (125)$$

$$X_{40} = \frac{11604,83}{40+273,16} = 37,05$$

$$X_{45} = \frac{11604,83}{45+273,16} = 36,47$$

$$X_{50} = \frac{11604,83}{50+273,16} = 35,91$$

Através da equação 118 foi calculado os resíduos (e_{ij}) para cada temperatura apresentados nas tabelas 22 e 23 e construído os gráficos 28 e 29 de adequação dos resíduos $\text{Ln}(-\text{Ln}(\text{Km}(\text{res.}))) \times \text{Ln}(\text{res.})$ para os modelos exponencial e Weibull. Para o modelo lognormal temos a tabela 24 e o gráfico 30 de adequação dos resíduos quantil da distribuição normal $\times \text{Ln}(\text{res.})$.

Tabela 22 – Resíduos para modelo Arrhenius-exponencial

Temperatura	Número de medições necessária para falha ocorrer	Ln(t)	$e_{ij}=Lne_{ij}^*$	Ln(-LnKm(res))
40	50	3,912023	-0,17013199	0,996228893
	53	3,970292	-0,111863082	0,583198081
	55	4,007333	-0,074821811	0,278961034
	57	4,043051	-0,039103728	-0,087421572
	59	4,077537	-0,004617552	-0,271624945
	61	4,110874	0,028718868	-0,783600688
	62	4,127134	0,044979389	-1,170683338
	62	4,127134	0,044979389	-1,170683338
	68	4,219508	0,137352709	-2,673752092
	70	4,248495	0,166340246	-3,384294493
45	39	3,663562	-0,186374419	1,224127541
	40	3,688879	-0,161056611	0,834032445
	43	3,7612	-0,088735949	0,375203292
	45	3,806662	-0,043273575	0,003296669
	47	3,850148	0,000211537	-0,464246379
	47	3,850148	0,000211537	-0,464246379
	48	3,871201	0,021264946	-0,671726992
	50	3,912023	0,06208694	-1,325375512
	52	3,951244	0,101307653	-1,944205697
	52	3,951244	0,101307653	-1,944205697
50	33	3,496508	-0,128395454	0,700571065
	34	3,526361	-0,098542491	0,475884995
	35	3,555348	-0,069554954	0,094047828
	35	3,555348	-0,069554954	0,094047828
	37	3,610918	-0,013985103	-0,17883003
	38	3,637586	0,012683144	-0,565661963
	39	3,663562	0,038658631	-0,902720456
	40	3,688879	0,063976439	-1,499939987
	42	3,73767	0,112766603	-2,250367327
	45	3,806662	0,181759474	-5,702213661

Gráfico 28 – Verificação adequação do modelo Arrhenius-exponencial

Tabela 23 - Resíduos para modelo Arrhenius-Weibull

Temperatura	Número de medições necessária para falha ocorrer	Ln(t)	$e_{ij}=Lne_{ij}^*$	Ln(-LnKm(res))
40	50	3,912023	-2,35339	0,99622889
	53	3,970292	-1,71225	0,58319808
	55	4,007333	-1,30468	0,27896103
	57	4,043051	-0,91167	-0,08742157
	59	4,077537	-0,53222	-0,27162494
	61	4,110874	-0,16541	-0,78360069
	62	4,127134	0,013505	-1,17068334
	62	4,127134	0,013505	-1,17068334
	68	4,219508	1,029898	-2,67375209
	70	4,248495	1,34885	-3,38429449
45	39	3,663562	-2,53087	1,22412754
	40	3,688879	-2,25229	0,83403245
	43	3,7612	-1,45654	0,37520329
	45	3,806662	-0,95631	0,00329667
	47	3,850148	-0,47784	-0,46424638
	47	3,850148	-0,47784	-0,46424638
	48	3,871201	-0,24619	-0,67172699
	50	3,912023	0,202977	-1,32537551
	52	3,951244	0,634527	-1,94420570
	52	3,951244	0,634527	-1,94420570
50	33	3,496508	-1,89172	0,70057107
	34	3,526361	-1,56325	0,47588500
	35	3,555348	-1,24429	0,09404783
	35	3,555348	-1,24429	0,09404783
	37	3,610918	-0,63285	-0,17883003
	38	3,637586	-0,33942	-0,56566196
	39	3,663562	-0,05361	-0,90272046
	40	3,688879	0,224966	-1,49993999
	42	3,73767	0,761809	-2,25036733
	45	3,806662	1,520945	-5,702213661

Gráfico 29 - Verificação adequação do modelo Arrhenius-Weibull

Tabela 24 - Resíduos para modelo Arrhenius-lognormal

Temperatura	Número de medições necessária para falha ocorrer	Ln(t)	$e_{ij}=Lne_{ij}^*$	Ln(-LnKm(res))
40	50	3,912023	-1,702901282	0,041203131
	53	3,970292	-1,102082494	0,103007829
	55	4,007333	-0,720144807	0,164812526
	57	4,043051	-0,351850707	0,247218789
	59	4,077537	0,003741035	0,28842192
	61	4,110874	0,347477485	0,391429749
	62	4,127134	0,515141969	0,453234446
	62	4,127134	0,515141969	0,453234446
	68	4,219508	1,467616077	0,57684384
	70	4,248495	1,766510587	0,597445406
45	39	3,663562	-1,87335763	0,020601566
	40	3,688879	-1,612302203	0,061804697
	43	3,7612	-0,866593837	0,14421096
	45	3,806662	-0,397824996	0,226617223
	47	3,850148	0,05055602	0,329625052
	47	3,850148	0,05055602	0,329625052
	48	3,871201	0,267640641	0,370828183
	50	3,912023	0,688561884	0,473836012
	52	3,951244	1,092972094	0,535640709
	52	3,951244	1,092972094	0,535640709
50	33	3,496508	-1,278414736	0,082406263
	34	3,526361	-0,970596695	0,123609394
	35	3,555348	-0,671702184	0,206015657
	35	3,555348	-0,671702184	0,206015657
	37	3,610918	-0,098713746	0,267820354
	38	3,637586	0,176266246	0,350226617
	39	3,663562	0,444103086	0,412031314
	40	3,688879	0,705158514	0,494437577
	42	3,73767	1,208240659	0,556242274
	45	3,806662	1,91963572	0,615987021

Gráfico 30 - Verificação adequação do modelo Arrhenius-lognormal

Com a proximidade de uma reta obtido nos gráficos de Arrhenius-exponencial, Arrhenius-Weibull e Arrhenius-lognormal, podemos concluir que os três modelos se mostram adequados para representar a distribuição dos tempos de falha estimados, comprovando a estimativa obtida com o estimador não paramétrico de Kaplan-Meyer, com exceção do modelo lognormal.

Os modelos de Arrhenius-exponencial e Arrhenius-Weibull e Arrhenius-lognormal serão utilizados para extrapolar os resultados para as condições de uso, isto é, à 22°C.

4.2.3.2. Cálculo da medida de confiabilidade MTTF

Para definir a confiabilidade do medidor de *Swirl*, usaremos o tempo médio para falha (MTTF), assim estimando o intervalo de calibração e manutenção do medidor de *Swirl*.

Portanto para temperatura de 22°C temos o coeficiente X_{22} dado pela equação 125:

$$X_i = \frac{11604,83}{T+273,16} \quad (125)$$

$$X_{22} = \frac{11604,83}{22+273,16}$$

$$X_{22} = 39,3170$$

Cálculo do MTTF para cada modelo de regressão.

4.2.3.2.1. Cálculo do MTTF Arrhenius-exponencial

O MTTF é cálculo através da equação 81:

$$\alpha = \text{MTTF} = t_p \quad (81)$$

Portanto teremos:

$$\widehat{\text{MTTF}} = -10,69 + (0,3989 * 39,3170)$$

$$\widehat{\text{MTTF}} = 145,95 \text{ medições}$$

4.2.3.2.2. Cálculo do MTTF Arrhenius-Weibull

O MTTF é cálculo através da equação 89:

$$\text{MTTF} = E(t) = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (89)$$

Portanto teremos:

$$\widehat{\text{MTTF}} = (\exp(-10,65 + (0,3987 * 39,3170))) * \Gamma\left(1 + \frac{1}{11,0031}\right)$$

$$\widehat{MTTF}=145,69 \text{ medições}$$

4.2.3.2.3. Cálculo do MTTF Arrhenius-lognormal

O MTTF é cálculo através da equação 99:

$$MTTF=\exp(\mu+\frac{\sigma^2}{2}) \quad (99)$$

Portanto teremos:

$$\widehat{MTTF}=\exp((-10,68+(0,3982*39,3170)+(\frac{0,096983^2}{2}))$$

$$\widehat{MTTF}=145,74 \text{ medições}$$

4.3. Resultados

Nos testes de capacidade e nos testes iniciais de confiabilidade, se confirmou que o arame de tensionamento é realmente o componente do medidor de torque que terá a maior probabilidade de contribuição a falha perseguida, sendo esta a perda do índice de capacidade Cg de 1,33, confirmando o resultado obtido com o FMEA e FTA realizado. Com isto, a cada perda da capacidade, o procedimento de manutenção a ser realizado será a troca do arame de tensionamento e calibração do medidor de torque. Portanto, se for realizado testes de vida no equipamento de medição do número de *Swirl* conforme proposto no fluxograma de trabalho, e obter tempos de falhas próximo aos estimados no exemplo apresentado. Para assim, pode-se concluir que o tempo médio para troca do arame e calibração realizando medições a 22°C é de 145 medições.

Como o MTTF representa somente uma média, algumas medições errôneas podem acontecer antes das 145 medições, portanto deve-se adotar um número menor de

medições para realizar a intervenção de manutenção, assim evitando obter medições errôneas.

Para isso, no caso do equipamento de medição do número de *Swirl*, podemos estimar uma variação da média em 5%, visto que durante a medição da capacidade as medições variaram em 2%, assim obtendo uma frequência para troca do arame e calibração a cada 138 medições.

5. DISCUSSÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

O procedimento de teste realizado para mensurar a capacidade do equipamento de medição do número de *Swirl* foi de fácil utilização, porém, na técnica 1, vários testes realizando as 30 medições foram feitos antes de obter o valor de C_g e C_{gk} maior ou igual a 1,33. Em alguns casos os índices foram encontrados fora de especificação, sendo estes somente próximo das últimas medições, gerando um desperdício de tempo. Este fato é inerente ao procedimento proposto, pois devido aos cálculos considerarem toda a variação dos dados, pode se ter um valor de C_g e C_{gk} fora do especificado na última medição.

Para amenizar os tempos de testes, iniciamos a realização de somente 20 medições. Encontrando valores de C_g e C_{gk} abaixo 0,7, os testes eram abortados e ações de correção ao equipamento de medição de *Swirl* foram efetuadas antes de iniciar nova sequência de medições. Procedimento esse que não foi descrito em nenhuma literatura estudada, mas nos auxiliou na redução de testes desnecessários.

Já para o procedimento de confiabilidade, com objetivo de se obter os tempos de manutenção do equipamento de medição do número de *Swirl*, testes de vida acelerado foram utilizados. Conforme apresentado nos conceitos de confiabilidade, testes de vida geralmente são caros e levam muito tempo para serem realizados, fato que foi comprovado nos testes iniciais, onde foi necessário realizar um número de medições maior do que o esperado (planejado 10 medições e realizado nos testes iniciais 30 sem obter falha), mesmo com o uso das técnicas de teste de vida acelerado.

Este fato se deve ao método de aceleração escolhido, que no caso foi a sobrecarga com a variável de estresse temperatura, pois o medidor de torque contém componentes eletrônicos de alta precisão, sendo estes muito sensíveis a temperatura, assim não conseguindo elevar a temperatura de forma significativa e obter os tempos de falha em um período de tempo que atendesse os prazos deste estudo, atentando ao fato de não ser desejado a geração de outra falha. Este foi o fator que contribuiu para a não redução dos tempos de teste conforme esperado durante o planejamento.

Com isto, deve-se evitar usar teste de vida acelerado com fator de estresse temperatura em equipamentos que dependem de componentes eletrônicos sensíveis, a não ser que um sistema especial para realização dos testes seja construído, evitando o superaquecimento dos componentes eletrônicos sensíveis.

Outra observação importante, são as formas de coleta dos dados. A automação melhora a qualidade dos resultados obtidos. Em equipamentos protótipos, como utilizado no estudo de caso, um sistema de coleta de dados operado manualmente foi utilizado no início dos testes, porém este foi abortado, devido a subjetividade dos dados, assim gerando dúvida quanto a capacidade obtida. Deve-se atentar a este fator antes do início dos testes.

6. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que com o procedimento proposto, conseguimos obter os intervalos de manutenção e calibração em sistemas de medição, projetados para obter uma alta confiabilidade.

Para um melhor entendimento, três tópicos do estudo foram analisados: o procedimento proposto, os valores obtidos durante as medições no estudo de caso e o resultado esperado.

Quanto ao procedimento proposto, pode-se concluir que tanto no procedimento para medir a capacidade do equipamento de medição do número de *Swirl*, quanto no procedimento para obter a confiabilidade das medições obtidas através de teste de vida acelerado, deve-se observar a necessidade de um período de testes iniciais para obter a experiência necessária para um planejamento dos testes de vida acelerados com assertividade.

Com falta de informações ou experiências anteriores, não será elaborado um bom planejamento dos testes de vida, com isto, a implantação do procedimento proposto pode perder sua credibilidade, fato esse não desejado.

Outro ponto que se deve uma maior atenção no procedimento proposto é que as condições de operação dos testes de vida acelerados são muito importantes, sua definição deve ser realizada com critérios de forma cuidadosa. O não atendimento as condições de operação estabelecidas, pode levar ao fracasso da aplicação do procedimento proposto.

Quanto aos valores obtidos durante as medições no estudo de caso, devido ao equipamento de medição do número de *Swirl* ser um protótipo, o número de *Swirl* não está correto, sendo este um erro de enviesamento, porém como estávamos em busca da sua repetibilidade e reprodutibilidade, este fato foi desconsiderado, concluindo-se que não há necessidade de aguardar a conclusão do projeto do equipamento de medição para iniciar o procedimento de capacidade.

Quanto ao resultado esperado, isto é, tempos de manutenção e calibração do equipamento de medição do número de *Swirl*, os investimentos necessários em

recursos operacionais na realização dos testes e físicos para elevar a temperatura do laboratório de testes, inviabilizou a conclusão dos testes.

Porém, utilizando tempos de falhas estimados, o procedimento proposto trouxe os tempos estimados de manutenção ou calibração do equipamento de medição do número de *Swirl*, comprovando uma possível eficácia do procedimento de estimação da confiabilidade dos resultados obtidos em sistemas de medição.

Contudo, por se tratarem de valores estimados, conclui-se que estes devem ser obtidos de outra forma, como está sugerido no capítulo 7.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como neste estudo não se conseguiu a conclusão dos testes de vida acelerado, sugere-se que estes sejam realizados para confirmação dos tempos de falha estimados, confirmando os resultados obtidos e a eficácia do procedimento proposto. Para isso, sugere-se que ao invés de realizar os testes de vida acelerado no conjunto completo, seja construído um dispositivo onde se consiga isolar termicamente o sensor de distância possibilitando o aumento da temperatura do teste e concentrando o aquecimento no medidor de torque, não sendo necessário aguardar que o ar aquecido que passa pelo medidor de torque o aqueça, com isto reduziremos ainda mais o tempo de teste. Acompanhar os resultados de medição durante o período de utilização do equipamento de medição do número de *Swirl* pode ser uma outra forma de obtenção dos dados, porém isso pode levar um tempo maior.

Sugere-se também realizar o procedimento proposto em outro sistema de medição, com uma complexidade menor que o equipamento de medição do número de *Swirl*, para aferição do procedimento proposto.

Outro trabalho a ser desenvolvido é elaborar um procedimento padronizado dos testes iniciais. Um procedimento para teste de vida iniciais testado e aprovado, auxiliaria na obtenção de bons resultados no estudo de caso.

8. REFERÊNCIAS

Automotive industry action group. **Measurement system analysis**. 4th ed., Southfield, MI, June 2010.

Azadeh, A.; Sheikhalishahi, M.; Aghsami, A. **An integrated FT-DFMEA approach for reliability analysis and product configuration considering warranty cost**. Production Engineering Resource Development, 9th ed., 2015. p. 635-646.

Balakrishnan, N.; Donghoon, H. **Optimal step-stress testing for progressive type-1 censored data from exponential distribution**. Journal of statistical planning and inference, 2009. p. 1782-1798.

Bertolini, M.; Bevilacqua, M.; Mason, G. **Reliability desing of industrial plants using petri nets**. Journal of quality in maintenance engineering, 2006. p. 397-411. 4 v.

Bethlehem, M.C. **Efficiencies of MLE and BLUE for parameters of an accelerated life-test model**. IEEE transaction on reliability, June 1988. 37 v.

Birolini, A. **Reliability engineering, theory and practice**. Firenze, Italy, 2007. 593 p.

Charles, E. E. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. New York: McGraw Hill, 1997. 486 p.

Cheng-Hung, H. et al. **Optimum step-stress accelerated degradation test for wiener degradation process under constraints**. European journal of operational research, 2015. p. 412-421.

Cheng-hung, H. et al. **Statistical equivalency and optimality of simple step-stress accelerated test plans for the exponential distribution**, Naval Research logistics, 2013. 60 v.

Colosimo, E.A.; Freitas, M.A. **Confiabilidade: Análise de tempo de falha e teste de vida acelerados**. Belo Horizonte: Escola de engenharia da UFMG, Fundação Christiano Ottoni, 1997. 309 p.

Colosimo, E.A.; Hudson, R. **Teste de vida acelerado: uma aplicação em sala de aula**. Universidade federal de Minas Gerais: Instituto de ciências exatas, departamento de estatística, Relatório técnico, 2002. 13 p.

Costa, A.F.B.; Epprecht, E.K.; Carpinetti, L.C.R. **Controle estatístico da qualidade**. Editora Atlas, 2a ed., São Paulo, 2009. 334 p.

Dhillon, B.S. **Mechanical reliability: theory, models, and applications**. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988, 330 p.

Dhillon, B.S. **Reliability engineering in systems design and operation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1983. 319 p.

Espinet, G. et al. **Temperture accelerated life test on commercial concentrator III-V triple junction solar cells and reliability analyses as a function of the operating temperature.** Progress in photovoltaics: Reserch and applications, 2015. p. 559-569.

Hanczar, B.; Dougherty, E.R. **The reliability of estimated confidence intervals for classification error rated when only a single sample is available.** Pattern recognition, 46, 2013. p. 1067-1077.

Ireson, W.G.; Coombs Junior, .C.F.; Moss, R.Y. **Handbook of reliability engineering and management.** New York: McGraw Hill, 1996. Many pages.

Ireson, W.G. **Reliability handbook.** New York: McGraw-Hill, 1982. Many pages.

Juran, J.M.; Gryna, F.M. **Quality planning analysis.** New York: Mcgraw-Hill, 4th ed., 1988. Many pages.

Keyence do Brasil. **Folha de dados IL-030.** Disponível em: <<http://www.keyence.com.br>>. Acesso em: 15 Nov. 2016.

Khodabandehloo, K. **Analyses of robot system using fault and event trees case studies.** Reliability engineering and system safety, Northern Ireland, 1996. p. 247-264.

Kouroush, J.; Joseph, P. **Failure mode and effect analysis on safety critical components of space travel.** Management science letters, 01 July 2015. p. 669-678. 5 v.

Lafraia, J.R.B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.** Rio de Janeiro: Qualitymark Petrobrás, 2006. 374 p.

Leitch, R.D. **Basic reliability engineering analysis.** Butterworth & Co., London, 1988. 147 p.

Leitch, R.D. **Reliability analysis for engineers.** Oxford: Oxford University Press, New York, 1995. 230 p.

Lindbom, H. et al. **The capability concept – On how to define and describe capability in relation to risk, vulnerability and resilience.** Reliability engineering and system safety, Mar. 2015. p. 45-54. 135 v.

Mahesh, S.R. et al. **Six sigma: concepts, tools, and applications.** Industrial management & data systems, 2005. p. 491-505. 105 v.

Microsoft Corporation. **Microsoft Excel®.** Disponível em: <<https://products.office.com/pt-br/excel>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

Minitab Inc. **Minitab17® Statistical Software.** Disponível em: <<http://www.minitab.com/pt-br>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

Montgomery, D.C. **Introduction to statistical quality control**. John Wiley & sons, 6th ed., Nova York, 2009.

Nelson, W. **Accelerated testing, statistical models, test plan and data analysis**. N.J.: Wiley-Interscience, New York, Hoboken, 1990. p. 601.

Nelson, W. **A bibliography of accelerated teste plans**. IEEE transaction on reliability, June 2005. 54 v.

Netzel, J.; Redpath, D.; Wallace, N. **Avoiding premature machinery failures definitions and analysis**. Sealing technology, 2002. p. 6-10.

Norma ASTM E2281-15. **Standard practice for process capability and performance measurement**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

Norma ASTM E2782-11e1. **Standard guide for measurement systems analysis (MSA)**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

Norma ASTM F1469-11. **Standard guide for conducting a repeatability and reproducibility study on test equipment for nondestructive testing**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

Norma ISO 22514-7. **Statistical methods in process management — Capability and performance — Part 7: capability of measurement processes**. Switzerland, 2012, 54 p.

Núñez, N. et al. **Evaluation of the reliability of high concentrator gas solar cells by means of temperature accelerated aging tests**. Progress in photovoltaics: research and applications, 21th ed., 2013. p. 1104-1113.

Pan, J. **Evaluating the gauge repeatability and reproducibility for different Industries**. Quality and quantity, 2006. p. 499-518. 40 v.

Patrick, D.T.O.; Kleyner, A. **Practical reliability engineering**. Chichester, England, 2012. 398 p.

ReliaSoft Corporation. **Probability Plotting Papers: normal/lognormal**. Disponível em: <<http://www.weibull.com/GPaper/>>. Acesso em: 13 Maio 2016 às 15:50.

ReliaSoft Corporation. **Probability Plotting Papers: Weibull**. Disponível em: <<http://www.weibull.com/GPaper/>>. Acesso em: 13 Maio 2016 às 15:35.

Russell, K. **Quick study: MTBF**. Computerworld, Oct. 2005. 30 p. 39 v.

Senvar, O.; Oktay, F.; Seniye, U. **An overview of capability evaluation of measurement systems and gauge repeatability and reproducibility studies**. International journal of metrology and quality engineering, 2010. p. 121-127. 2 v.

Shi, L.; Chen, W.; Liang, F.L. **An approach for simple linear profile gauge GRR studies**. Discrete dynamics in nature and society, 2014.

Shu-Ho, D.; Ming-O, W. **Reliability analysis in engineering applications**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 433 p.

Sinha, P. **Reliability paper - towards higher maintenance effectiveness**. International journal of quality & reliability management, 2015. p. 754-762. 32 v.

Sloop, R. **Understand gage RR**. Quality, Sept. 2009. p. 44-47. 48 v.

Solid State Tecnlogy. **An reliability engineers dream comes along.**, Cengage Learning, Mar. 2009. p. 15-18. 52 v.

Souza, P. **Modelos de testes de vida acelerado: descrição e aplicação**. Universidade federal de Ouro Preto: curso de estatística, Mar 2013.

Summerville, N. **Basic reliability: an introduction to reliability engineering**. Bloomington, IN: Author House, 2004. 108 p.

Tabisz, R. **The capability evaluating of industrial measurement systems**. XVII IMEKO world congress, Dubrovnik, Croatia, June 2003. p. 2185-2188.

Tang, L.; Xu, K. **A multiple objective framework for planning accelerated life tests**, IEEE transaction on reliability. IEEE transaction on reliability, Mar. 2005. 54 v.

Tsu-Ming, Y.; Jia-Jeng, S. **Using the monte carlo simulation methods in gauge repeatability and reproducibility of measurement system analysis**. Journal of applied research and technology, Oct. 2013. p. 780-796. 11 v.

Villemeur, A. **Reliability, availability, maintainability and safety assessment**. Chichester, England, 1992. 363 p.

Yang, G. **Life cycle reliability engineering**. Hoboken, New Jersey, Canada, 2007. 517 p.

Apêndice A1 – FMEA Medidor de torque

EMPRESA: USP			FMEA - Análise do modo e efeito de falha							
Local: São Paulo			Setor: Mestrado Poli Usp			Sistema: Medidor de torque				
Conjunto	Componente	Função do componente	Possíveis falhas			Controle Atual	Índices			RPN
			Modo(s)	Efeito(s)	Causa(s)		F	G	D	
Corpo	Corpo	Transferir o fluxo de ar através do retificadores	Transferir o fluxo parcialmente	Erro na medição	Trinca	não há	2	6	5	60
		Alojar retificador de fluxo superior	Não alojar	Erro na medição Impossibilidade de montar a máquina Danos no retificador	Erro dimensional	não há	3	4	5	60
					Amassamento das bordas	não há	2	4	3	24
					Rebarba na usinagem	não há	3	4	3	36
			Alojar parcialmente		Erro dimensional	não há	2	6	5	60
					Sujidade no canal	não há	3	6	3	54
			Alojar de forma incorreta		Erro dimensional de posicionamento (descentralização)	não há	2	6	5	60
		Possibilitar fixação do suporte de cabeçote	Possibilitar a não fixação	Erro na medição Impossibilidade de montar a máquina	Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60
					Falta rosca	não há	2	4	3	24
			Possibilitar fixar parcial		Erro de usinagem superficial (empenamento)	não há	2	6	5	60
					Rosca danificada	não há	3	6	3	54
					Rebarba na usinagem	não há	3	6	3	54
			Possibilitar fixar de forma incorreta		Erro dimensional de posicionamento (descentralização)	não há	2	6	5	60
				Erro na medição	Falta rosca	não há	2	4	3	24

		Possibilitar a montagem do suporte da chapa de mola	Possibilitar a não montagem		Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	3	36
			Possibilitar montar parcial		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60
			Possibilidade de montar incorreto (interferência do arame no corpo)		Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
					Erro dimensional de posicionamento	não há	2	6	5	60
		Possibilitar a montagem do anel de vedação superior	Possibilitar a não montagem	Erro na medição	Erro dimensional no canal	não há	3	4	5	60
			Possibilitar montar parcialmente		Rebarba na usinagem	não há	3	4	3	36
			Possibilidade de montar incorreto		Sujidade no canal	não há	3	6	3	54
					Erro dimensional de posicionamento (descentralização)	não há	2	6	5	60
		Possibilitar a montagem do visor nível de óleo	Possibilitar a não montagem	Erro na medição Vazamento de óleo	Falta rosca	não há	2	4	3	24
			Possibilitar montar parcialmente		Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60
			Possibilidade de montar incorreto		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60
					Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
		Possibilitar a montagem do pino das polias de calibração	Possibilitar a não montagem	Erro na medição Erro na calibração	Falta rosca	não há	2	4	3	24
					Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60

			Possibilitar montar parcialmente		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60
					Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
			Possibilidade de montar incorreto		Erro dimensional de posicionamento	não há	2	6	5	60
		Possibilitar a montagem das tampas	Possibilitar a não montagem	Erro na medição	Falta rosca	não há	2	4	3	24
					Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60
			Possibilitar montar parcialmente		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60
					Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
			Possibilidade de montar incorreto		Erro dimensional de posicionamento	não há	2	6	5	60
		Possibilitar a montagem dos grampos dos arames	Possibilitar a não montagem	Erro na medição	Falta rosca	não há	2	4	3	24
					Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60
			Possibilitar montar parcialmente		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60
					Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
			Possibilidade de montar incorreto (interferência do arame no corpo)		Erro dimensional de posicionamento	não há	2	6	5	60
		Possibilitar a montagem do anel de vedação das tampas	Possibilitar a não montagem	Erro na medição	Erro dimensional no canal	não há	3	4	5	60
					Rebarba na usinagem	não há	3	4	3	36
			Possibilitar montar parcialmente		Sujidade no canal	não há	3	6	3	54
					Possibilidade de montar incorreto	Erro dimensional de posicionamento	não há	2	6	5

		Possibilitar a montagem do suporte axial	Possibilitar a não montagem	Erro na medição	Falta rosca	não há	2	4	3	24
					Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60
					Erro dimensional no diâmetro interno do tubo	não há	3	4	5	60
			Possibilitar montagem parcial		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60
			Possibilitar a montagem de forma incorreta		Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
					Erro dimensional na profundidade do rebaixo	não há	2	6	5	60
		Possibilitar fixação no tambor de retificação	Possibilitar a não Fixação	Erro na medição Impossibilidade de montar a máquina	Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60
					Falta rosca	não há	2	4	3	24
			Possibilitar fixar parcial		Erro de usinagem superficial (empenamento)	não há	2	6	5	60
					Rosca danificada	não há	3	6	3	54
			Possibilitar fixar de forma incorreta		Rebarba na usinagem	não há	3	6	3	54
					Erro dimensional de posicionamento (descentralização)	não há	2	6	5	60
		Possibilitar a montagem da placa do sensor a laser	Possibilitar a não montagem	Erro na medição	Falta rosca	não há	2	4	3	24
					Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60
			Possibilitar montar parcialmente		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60

					Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
			Possibilidade de montar incorreto			Erro dimensional de posicionamento	não há	2	6	5
	Anel de vedação superior	Vedar passagem de ar entre corpo e suporte do cabeçote	Não vedar	Ruído durante a operação	Erro de especificação	não há	2	2	3	12
					Erro dimensional	não há	2	2	5	20
			Vedar parcialmente		Erro de especificação	não há	2	2	3	12
					Erro dimensional	não há	2	2	5	20
					Deterioração por Temperatura de operação fora do especificado	não há	3	2	5	30
					Quebra do anel	não há	2	2	3	12
	Vedar de forma incorreta	Erro de posicionamento do anel durante a montagem	não há	5	2	3	30			
	Anel de vedação das tampas	Vedar passagem de ar entre a tampa e o corpo/placa fixação sensor de laser	Não vedar	Erro na medição	Erro de especificação	não há	2	6	3	36
					Erro dimensional	não há	2	6	5	60
			Vedar parcialmente		Erro de especificação	não há	2	6	3	36
					Deterioração por Temperatura de operação fora do especificado	não há	2	6	5	60
					Quebra do anel	não há	2	6	5	60
					Erro dimensional	não há	2	6	5	60
Vedar de forma incorreta			Erro de posicionamento do anel durante a montagem		não há	3	6	3	54	
Tampas	Vedar contra vazamento	Não vedar	Erro na medição	Erro dimensional dos furos de fixação	não há	3	4	5	60	

Calibração			Vedar parcialmente		Erro dimensional no canal do anel de vedação	não há	2	6	5	60
			Trinca devido a vibração		não há	2	6	3	36	
			Vedar de forma incorreta		não há	2	6	5	60	
			Desvio de torque		não há	4	6	5	120	
	Espaçador axial	Centralizar retificador inferior	Não centralizar	Erro na medição	Erro dimensional	não há	2	4	5	40
			Centralizar de forma incorreta		Erro de concentricidade	não há	2	6	5	60
		Apoio para esfera	Apoiar de forma incorreta		Erro dimensional no comprimento	não há	2	6	5	60
					Desgaste prematuro por sujidade	não há	6	6	5	180
	Retificador de fluxo ar inferior	Retificar o fluxo de para o tambor	Não retificar	Erro na medição	Erro dimensional no furo do espaçador	não há	3	4	5	60
					Erro dimensional no diâmetro externo	não há	3	4	5	60
			Retificar de forma de forma incorreta		Entupimento devido sujidade no ar.	não há	5	6	8	240
					Erro dimensional nos furos da colmeia	não há	2	6	5	60
	Suporte das polias	Fixar pinos das polias de calibração	Não fixar	Erro na calibração Ruído durante a operação	Erro dimensional no diâmetro de interferência com o corpo (maior)	não há	3	4	5	60
			Fixar de forma parcial		Erro dimensional no diâmetro de interferência com o corpo (menor)	não há	2	6	5	60

			Fixar de forma incorreta		Erro dimensional no comprimento do eixo de interferência	não há	2	6	5	60
Rolamento das polias	Reduzir atrito mecânico das polias	Não reduzir	Erro na calibração	Rolamento danificado	não há	2	4	3	24	
				Rolamento fora do especificado	não há	2	4	3	24	
				Rolamento montado desalinhado	não há	3	4	3	36	
		Reduzir parcialmente		Rolamento desgastado	não há	2	6	3	36	
Espaceador das polias de calibração	Afastar as polias do suporte	Não espaçar	Erro na calibração (desalinhamento entre as polias)	Erro dimensional na furo	não há	3	4	5	60	
		Espaçar de forma incorreta		Erro dimensional na espessura	não há	3	4	5	60	
Pino das polias de calibração	Fixar os rolamentos das polias	Não fixar	Erro na calibração	Erro dimensional no diâmetro (maior)	não há	3	4	5	60	
		Fixar de forma parcial		Erro dimensional no diâmetro (menor)	não há	3	4	5	60	
		Fixar de forma incorreta		Erro de concentricidade	não há	2	4	5	40	
Polias de calibração	Suportar fio de arame de calibração	Não suportar	Erro na calibração Ruído durante a operação	Erro dimensional no diâmetro interno de montagem do rolamento	não há	3	4	5	60	
		Suportar de forma incorreta		Erro de concentricidade da polia	não há	2	6	5	60	
				Erro dimensional no diâmetro interno do V da polia	não há	2	6	5	60	
				Erro de rugosidade no V da polia	não há	2	6	5	60	

Medidor de torque					Erro dimensional na profundidade do rebaixo do rolamento	não há	2	6	5	60	
	Braço de calibração	Transmitir momento gerado pelos pesos ao eixo	Não transmitir	Erro na calibração	Erro dimensional nas roscas	não há	3	4	5	60	
			Transmitir de forma incorreta		Desvio dimensional no posicionamento dos canais	não há	2	6	5	60	
					Erro dimensional no diâmetro interno do V da polia	não há	2	6	5	60	
					Erro de rugosidade no V da polia	não há	2	6	5	60	
					Erro de concentricidade	não há	2	6	5	60	
					Desvio de torque na montagem	não há	4	6	5	120	
			Interferência com o corpo	Erro na medição	Desvio de torque na montagem	não há	4	8	5	160	
			Pesos de calibração		Acrescentar peso errado	Erro na calibração	Erro de especificação	não há	2	8	3
	Placas do sensor de laser	Possibilitar a fixação do sensor de laser	Não possibilitar a fixação	Erro na medição Ruído durante a operação	Falta rosca	não há	2	4	3	24	
					Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60	
			Possibilitar fixação parcial		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60	
			Possibilitar fixação de forma incorreta		Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36	
					Erro dimensional de posicionamento	não há	2	6	5	60	

					Desvio de torque da placa de fixação no corpo	não há	4	6	5	120
Sensor de distância	Medir deslocamento do braço de medição	Não medir	Erro na medição	Erro dimensional nos furos de fixação	não há	3	4	5	60	
				Sensor danificado	não há	2	4	3	24	
				Cabo danificado devido vibração	não há	2	4	3	24	
		Medir de forma incorreta		Desvio de torque na fixação	não há	4	6	5	120	
				Erro de calibração do sensor	não há	2	8	5	80	
Chapas de mola	Tensionar o arame	Tensionar parcialmente	Erro na medição	Erro de especificação	não há	2	8	3	48	
		Tensionar de forma incorreta		Trinca por fadiga	não há	2	8	9	144	
				Erro de posicionamento nos blocos de fixação	não há	3	8	3	72	
Grampo dos arames lado rígido	Fixar os arames	Não fixar	Erro na medição	Erro dimensional nos blocos	não há	3	4	5	60	
				Falta rosca	não há	2	4	3	24	
				Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60	
		Fixar de forma parcial	Ruído durante a operação	Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60	
				Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36	
				Erro dimensional nos blocos	não há	2	6	5	60	
		Fixar de forma incorreta		Desvio de torque na fixação no corpo	não há	4	6	5	120	

					Desvio de torque na fixação do arame	não há	4	6	5	120
				Erro de medição (interferência do arame com o corpo)	Erro dimensional no canal do arame	não há	2	6	5	60
	Grampo das chapas de mola	Fixar as chapas de mola	Não fixar	Erro na medição Ruído durante a operação	Erro dimensional nos blocos	não há	3	4	5	60
					Falta rosca	não há	2	4	3	24
					Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60
			Fixar de forma parcial		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60
					Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
					Erro dimensional nos blocos	não há	2	6	5	60
			Fixar de forma incorreta		Desvio de torque na fixação no corpo	não há	4	6	5	120
	Grampo dos arames lado móvel	Fixar os arames e chapas de mola	Não fixar	Erro na medição Ruído durante a operação	Erro dimensional nos blocos	não há	3	4	5	60
					Falta rosca	não há	2	4	3	24
					Erro dimensional na rosca (diâmetro , padrão ou centro)	não há	3	4	5	60
			Fixar de forma parcial		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60
					Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
					Erro dimensional nos blocos	não há	2	6	5	60
			Fixar de forma incorreta		Desvio de torque na fixação das chapas	não há	4	6	5	120

					Desvio de torque na fixação do arame	não há	4	6	5	120
				Erro de medição (interferência do arame com o corpo)	Erro dimensional no canal do arame	não há	2	6	5	60
	Arame de tensionamento	Manter o eixo posicionado	Não posicionar	Erro na medição	Erro dimensional causando a não montagem	não há	2	6	5	60
					Quebra devido a fadiga	não há	7	8	9	504
					Erro de especificação	não há	2	8	5	80
					Erro de montagem do arame	não há	6	9	8	432
		Manter o eixo tensionado	Não tensionar	Erro na medição	Erro dimensional causando a não montagem	não há	2	6	5	60
					Quebra devido a fadiga	não há	5	8	9	360
			Tensionar de forma parcial		Escoamento devido a fadiga	não há	7	8	9	504
			Tencionar de forma incorreta		Erro de especificação	não há	2	8	5	80
				Erro na calibração	não há	6	9	8	432	
Eixo	Transferir movimento da retificador de fluxo ao braço de medição e braço de calibração	Não transferir	Erro na medição Erro na calibração	Erro dimensional no diâmetro de montagem do retificador de ar (maior)	não há	3	4	5	60	
				Erro dimensional no encaixe das presilhas do arame (encaixe menores e roscas fora do especificado)	não há	3	4	5	60	
				Erro dimensional no encaixe do arame (maior)	não há	3	4	5	60	

					Erro dimensional na furação de montagem do braço de medição	não há	3	4	5	60
					Erro dimensional na furação de montagem do braço de calibração	não há	3	4	5	60
					Erro dimensional no furo da esfera (menor)	não há	3	4	5	60
			Transferir parcialmente		Erro dimensional no encaixe das presilhas do arame (interferência parcial)	não há	2	6	5	60
			Transferir parcialmente		Erro dimensional no encaixe do arame (interferência parcial)	não há	2	6	5	60
			Transferir parcialmente		Erro dimensional na rosca	não há	2	6	5	60
			Transferir parcialmente		Sujidade na rosca	não há	2	6	3	36
			Transferir parcialmente		Erro dimensional no furo da esfera (interferência parcial)	não há	2	6	5	60
			Transferir de forma incorreta		Desgaste prematuro por sujidade no contato com a esfera	não há	2	6	5	60
			Transferir de forma incorreta		Erro de posicionamento no arame	não há	6	6	3	108

	Presilhas dos arames no eixo	Fixar arame no eixo	Não fixar	Erro na medição	Erro dimensional (maior)	não há	3	4	5	60
					Erro dimensional na furação (deslocada, menor)	não há	3	4	5	60
					Erro dimensional no encaixe do arame (maior)	não há	3	4	5	60
			Fixar de forma parcial		Erro dimensional (interferência)	não há	2	6	5	60
					Erro dimensional na furação (interferência)	não há	2	6	5	60
					Erro dimensional no encaixe do arame	não há	2	6	5	60
			Fixar de forma incorreta		Desvio de torque	não há	4	6	5	120
	Braço de medição	Transmitir movimento de deslocamento do eixo	Não transmitir	Erro na medição	Erro dimensional nas roscas	não há	3	4	5	60
			Transmitir de forma incorreta		Desvio dimensional no rebaixo	não há	2	6	5	60
					Erro de concentricidade	não há	2	6	5	60
					Desvio de torque na montagem	não há	4	6	5	120
					Sujidade na área de medição	não há	3	6	5	90
			Interferência com o corpo		Desvio de torque na montagem	não há	4	6	5	120
Retificador de fluxo ar de superior	Transferir momento gerado pelo fluxo de ar ao eixo	Não transferir	Erro na medição	Erro dimensional no encaixe do eixo	não há	2	6	5	60	
				Erro dimensional no diâmetro externo	não há	2	6	5	60	

			Transferir de forma incorreta		Quebra parcial das colmeias devido sujidade	não há	3	6	8	144
					Entupimento devido sujidade no ar.	não há	5	8	8	320
					Erro dimensional nos furos da colmeia	não há	2	8	5	80
	Visor nível de óleo	Mostrar nível de óleo	Não mostrar	Erro na medição	Erro dimensional	não há	2	4	5	40
			Mostrar parcialmente		Sujidade no mostrador	não há	3	8	2	48
			Vazamento de óleo		Erro dimensional na vedação	não há	2	6	5	60
					Vedação danificada na montagem	não há	2	6	5	60
					Vedação deteriorada	não há	2	6	5	60
					Erro de especificação	não há	2	4	3	24
	Óleo de lubrificação	Lubrificação entre corpo e retificador de ar superior	Não lubrificar	Erro na medição	Falta de óleo	não há	4	9	3	108
Não lubrificar (travar Retificador de fluxo de ar)			Excesso de sujidade		não há	3	9	3	81	
Lubrificar parcialmente			Quantidade de óleo fora do especificado		não há	4	9	3	108	
Lubrificar de forma incorreta			Temperatura do óleo fora do especificado		não há	2	6	5	60	
			Óleo fora da validade		não há	4	9	3	108	
			Erro de especificação do óleo		não há	2	8	5	80	
			Sujidade no óleo		não há	5	8	6	240	
Esfera			Suportar eixo no sentido axial		Não suportar	Erro na medição	Erro dimensional	não há	2	4
	Suportar de forma incorreta	Erro de especificação		não há	2		4	5	40	
		Desgaste prematuro por sujidade		não há	2		6	5	60	
		Erro de centralidade		não há	2		6	5	60	

Anexo A – Folha de dados do sensor de distância

Data Sheet

IL-030

Cabeças sensoras

ESPECIFICAÇÕES

Modelo		IL-030
Distância de referência		30 mm
Alcance de medição		20 a 45 mm
Fonte de luz	Tipo	Laser vermelho de semicondutor, comprimento de onda: 655 nm (luz visível)
	Classe de laser	Classe 1 (FDA (CDRH) Part1040.10) ¹⁾ Classe 1 (IEC 60825-1)
	Saída	220 μ W
Diâmetro do ponto (à distância padrão)		Aprox. 200 a 750 μ m
Linearidade		$\pm 0,1\%$ da E.C. (25 a 35 mm) ²⁾
Repetitividade		1 μ m ³⁾
Taxa de amostragem		0,33/1/2/5 ms (4 níveis disponíveis)
Indicadores de status de operação		Indicador de advertência de emissão de laser: LED verde, indicador de alcance analógico: LED laranja, indicador de distância de referência: LED Vermelho/Verde
Características de temperatura		0,05% da E.C./°C ³⁾
Resistência ambiental	Grau de proteção	IP67
	Iluminação do ambiente	Lâmpada incandescente: 5000 lux ⁴⁾
	Temperatura ambiente	-10 a +50 °C (sem condensação nem congelar)
	Umidade relativa	35 a 85% UR (sem condensação)
	Vibração	10 a 55 Hz Amplitude dupla 1,5 mm XYZ cada eixo: 2 horas
Grau de poluição		3
Material		Material da carcaça: PBT, Pega metálica: SUS304, Embalagem: NBR, Tampa da lente: Vidro, Cabo: PVC
Peso		Aprox. 60 g

¹⁾ A classificação do laser para FDA (CDRH) é implementada com base na IEC 60825-1 de acordo com os requisitos do Laser Notice No.50.

²⁾ Valor ao medir o alvo padrão KEYENCE (objeto difuso branco).

³⁾ E.C. de cada modelo é o seguinte: IL-030: ± 5 mm IL-065: ± 10 mm IL-100: ± 20 mm IL-300: ± 140 mm IL-600: ± 400 mm

⁴⁾ Valor ao medir o alvo padrão KEYENCE (objeto difuso branco) na distância de referência, taxa de amostragem: 1 ms, e número médio de vezes: 128. Para o IL-300/IL-600, a taxa de amostragem é de 2 ms.

⁵⁾ Valor quando a taxa de amostragem é definida para 2 ms ou 5 ms.