

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA**  
**ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**PETTERSON CARLOS ÂNGELO**

**COMPARATIVO ENTRE MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE PARA**  
**BOMBAS CENTRÍFUGAS APLICADAS NA INDÚSTRIA DE**  
**CELULOSE.**

**MONOGRAFIA - ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2015**

**|**

**PETTERSON CARLOS ANGELO**

**COMPARATIVO ENTRE MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE PARA  
BOMBAS CENTRÍFUGAS APLICADAS NA INDÚSTRIA DE  
CELULOSE.**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do DAELT - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni.

**CURITIBA**

**2015**

**II**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **COMPARATIVO ENTRE MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS APLICADAS NA INDÚSTRIA DE CELULOSE.**

**PETTERSON CARLOS ÂNGELO**

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 18 de janeiro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso de Especialização  
em Engenharia da Confiabilidade

Banca Examinadora:

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
UTFPR

---

Prof. Carlos Mariano Dr.  
UTFPR

---

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.  
UTFPR

Dedico este trabalho a toda minha família, especialmente a minha esposa Fernanda pelos momentos de ausência, aos meus pais Carlos Aparecido Angelo e Marinês Prado, minha irmã Caroene Angelo, a todos meus amigos, colegas e também aos professores.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças e sabedoria para poder desfrutar do cumprimento de mais essa missão e a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida.

Certamente foram tantas que dificilmente conseguirei citá-las nesse trabalho.

Mas de qualquer forma peço desculpas àquelas que não se encontram presente entre essas as palavras, mas que todas elas possam ter certeza que sempre farão parte da minha história de vida e eternamente serei grato.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Emerson Rigoni, pela sabedoria e paciência com que me guiou durante nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala pelos momentos de aprendizagem e descontração. Mas principalmente à minha família, pois acredito que sem o apoio deles jamais teria atingido esse importante objetivo.

Enfim, a todos os que por algum motivo direto ou indireto contribuíram para a realização desta pesquisa.

O mundo não será destruído por aqueles  
que fazem o mal, mas por aqueles que  
olham e não fazem nada.

(Albert Einstein, 1879 - 1955)

## RESUMO

ÂNGELO, P. C. Comparativo entre Métricas de Confiabilidade para Bombas Centrífugas Aplicadas na Indústria de Celulose. 2016. 92p. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Engenharia de Confiabilidade – UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

O objetivo desse trabalho é apresentar os principais conceitos da engenharia de confiabilidade aplicados em bombas centrífugas, relacionando as consequências causadas pelas práticas mais comuns de instalação e uso desses equipamentos. Também através da ferramenta de LDA “*Life Date Analysis*” comparar as principais métricas de confiabilidade de duas importantes fábricas de celulose situadas na região Centro-oeste do país.

**Palavras-chave:** Confiabilidade, Bombas centrífugas, Indústria de celulose.

## ABSTRACT

ÂNGELO, P. C. Comparing Reliability Metrics for Centrifugal Pumps Applied in the Pulp Industry. 2016. 92p. Work Specialization Course Completion Reliability Engineering - UTFPR - Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2016.

The purpose of this paper is to present the reliability engineering concepts applied in centrifugal pumps, the consequences caused by the most common practices of installation and use of such equipment. Also through of tool the Life Data Analysis (LDA), to compare key metrics of reliability of two important pulp mills located in the center-west of the country.

**Keywords:** Reliability, Centrifugal Pumps, Pulp industry.



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 TEMA .....	15
1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	18
1.2.1 Objetivo Geral .....	18
1.2.2 Objetivo Específico.....	18
1.2.3 Justificativa.....	19
1.2.4 Estrutura do trabalho.....	19
<b>2 A INDÚSTRIA DE CELULOSE E AS BOMBAS CENTRÍFUGAS. ....</b>	<b>20</b>
2.1 INDÚSTRIA DE CELULOSE.....	20
2.2 IMPORTÂNCIA DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	23
2.2.1 Novos Projetos .....	23
2.3 CONFIABILIDADE DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	23
2.3.1 Tipos de Bombas Centrífugas .....	25
2.3.1.1 Sucção Axial .....	25
2.3.1.2 Dupla Sucção.....	25
2.3.1.3 Bombas multiestágio.....	26
2.3.1.4 Bombas API “ <i>American Petroleum Institute</i> ”.....	26
2.3.1.5 Bombas ANSI “ <i>American National Standards Institute</i> ” .....	27
2.3.2 Instalação das Bombas Centrífugas .....	28
2.3.2.1 Base de Fundação.....	28
2.3.2.2 Alinhamento .....	31
2.3.2.3 Configuração da tubulação .....	34
2.3.2.4 Esforço nas tubulações.....	38
2.3.3 Melhor Ponto de Eficiência (BEP).....	41
<b>3 ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE .....</b>	<b>44</b>
3.1 CONFIABILIDADE .....	44
3.2 COMPONENTE .....	44
3.3 EQUIPAMENTO .....	45
3.4 SISTEMA .....	45
3.5 FALHA .....	46
3.6 MODOS DE FALHA.....	46
3.7 FALHA PREMATURA.....	46
3.8 FALHA ALEATÓRIA .....	46
3.9 FALHA POR DESGASTE .....	46
3.10 FALHA POTENCIAL.....	47
3.11 ORIGEM DAS FALHAS.....	47

3.11.1 Falhas de projeto.....	48
3.11.2 Falhas por operação.....	49
3.11.3 Falhas por manutenção.....	49
3.12 TEMPO MÉDIO PARA FALHAR (TMPF).....	50
3.13 TEMPO MÉDIO PARA REPARAR (TMPR).....	50
3.14 TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (TMEF).....	50
3.15 MANTENABILIDADE.....	51
3.16 SUPORTABILIDADE.....	51
3.17 DISPONIBILIDADE.....	52
3.18 VIDA ÚTIL.....	52
3.19 Dados.....	52
3.20 ANÁLISE DOS DADOS DE VIDA.....	53
3.20.1 Tratamento dos Dados.....	54
3.20.2 Condições de Operação.....	54
3.21 MÉTODOS.....	55
3.21.1 Método da Regressão (Mínimos Quadrados) - RRX.....	55
3.21.2 Método da Máxima Verossimilhança – MLE.....	56
3.21.3 Comparando os Métodos.....	57
3.22 INTERVALOS DE CONFIANÇA.....	58
3.23 MÉTRICAS DA CONFIABILIDADE.....	59
3.24 FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE FALHA.....	61
3.25 A TAXA INSTANTÂNEA DE FALHAS.....	63
3.26 DISTRIBUIÇÕES USADAS EM CONFIABILIDADE.....	63
3.26.1 Distribuições Discretas.....	64
3.26.2 Distribuições Contínuas.....	64
3.27 MODELOS PROBABILISTICOS.....	64
3.27.1 Distribuição Exponencial.....	65
3.27.2 Distribuição Log-Normal.....	66
3.27.3 Distribuição Weibull.....	68
3.27.4 Distribuição Weibull Mista.....	72
3.28 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS.....	72
3.28.1 Sistema Reparável.....	73
3.28.2 Sistema Não-Reparável.....	73
3.28.3 Sistema em Série.....	74
3.28.4 Sistema em Paralelo.....	75
<b>4 COMPARAÇÃO DE MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE.....</b>	<b>77</b>
4.1 CELULOSE A.....	77
4.2 CELULOSE B.....	85
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>92</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação geral das bombas.	15
Figura 2 - Princípio de funcionamento. Fonte: Menin (2009).	16
Figura 3 - Tipos de bombas centrífugas. Fonte: Yesyen (2015).	17
Figura 4 - Configuração básica das bombas centrífugas. Fonte: Menin (2009).	17
Figura 5 – RBD de uma bomba centrífuga.	24
Figura 6 - Bomba de Dupla Sucção.	25
Figura 7 - Bomba múltiplos estágio	26
Figura 8 - Construção típica API	27
Figura 9 – Construção típica ANSI.	27
Figura 10 - Base de Fundação	29
Figura 11 - Condição típica de desalinhamento	31
Figura 12 - Análise Termográfica	32
Figura 13 - Regime de fluxo.	34
Figura 14 - Influência hidráulica na sucção da bomba.	34
Figura 15 - Diâmetro da tubulação de sucção.	35
Figura 16 - Varias bombas em uma unica tubulação	36
Figura 17 - Comprimento reto da tubulação de sucção	37
Figura 18 - Tubulação suportada	39
Figura 19 - Desalinhamento radial e angular	39
Figura 20 - Sintomas e efeito na confiabilidade causado pelo BEP	41
Figura 21 - Representação de um componente.	44
Figura 22 - Representação de um equipamento com componentes em série.	45
Figura 23 - Falha potencial	47
Figura 24 - Relação entre o Esforço e a Resistência	48
Figura 25 - Esforço e Resistência incorretamente avaliados	48
Figura 26 - Aumento do Esforço	49
Figura 27 - Diminuição da resistência	49
Figura 28 - Definição MTBF	51
Figura 29 - Classificação dos tipos de dados	53
Figura 30 - Curva de Regressão	56
Figura 31 - Intervalo de Confiança Bilateral.	58
Figura 32 - Intervalos de Confiança Unilateral Inferior e Superior	59
Figura 33 - Representação das funções $F(t)$ e $R(t)$ .	60
Figura 34 - Função densidade de probabilidade.	61
Figura 35 – Representação de $F(t)$ , $R(t)$ E $f(t)$ .	62
Figura 36 – PDF Exponencial.	66

Figura 37 - Função densidade para distribuição Lognormal.	67
Figura 38 - Influência do Beta na Função Densidade Weibull	69
Figura 39 - Taxa de falhas em função de beta	70
Figura 40 - Curva da banheira	70
Figura 41 – Probabilidade Weibull mista	72
Figura 42 – RBD em Série	74
Figura 43 – R(t) do sistema em série.	74
Figura 44 - RBD Sistema em Paralelo	75
Figura 45 – R(t) Sistema em paralelo	76
Figura 46 - Teste de aderência / Celulose A	80
Figura 47 - Probabilidade Weibull / Celulose A	82
Figura 48 - PDF / Celulose A	82
Figura 49 - Confiabilidade R(t) / Celulose A	83
Figura 50 - Probabilidade de Falha / Celulose A	83
Figura 51 - Tempo Médio para Falhar (MTTF) / Celulose A	84
Figura 52 - Análises BX25%, BX50% e BX75% / Celulose A	84
Figura 53 - Teste de aderência / Celulose B	88
Figura 54 - Probabilidade Weibull / Celulose B	89
Figura 55 – Função de densidade de Probabilidade (PDF) / Celulose B	89
Figura 56 - Confiabilidade R(t) / Celulose B	90
Figura 57 - Probabilidade de Falha / Celulose B	90
Figura 58 - Tempo Médio para Falhar (MTTF) / Celulose B	91
Figura 61 - Análises BX25%, BX50% e BX75% / Celulose B	91

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Os maiores compradores de celulose..	21
Gráfico 2 - Balança Comercial do Setor 1994 – 2013.	22
Gráfico 3 - Matriz energética do setor.	22
Gráfico 4 - Efeitos da base de fundação na vida dos componentes.....	30
Gráfico 5 - Relação custo da base de fundação & confiabilidade.	30
Gráfico 6 - Efeitos do desalinhamento na Vida dos Componentes .....	33
Gráfico 7 - Relação do custo do alinhamento & confiabilidade .....	33
Gráfico 8 - Efeitos da tubulação na vida dos componentes .....	37
Gráfico 9 - Relação do custo da tubulação & confiabilidade .....	38
Gráfico 10 - Efeitos dos esforços da tubulação na vida dos componentes .....	40
Gráfico 11 - Relação do custo do desalinhamento & confiabilidade.....	41
Gráfico 12 - Efeitos do BEP na Vida dos Componentes .....	42
Gráfico 13 - Relação do Custo do BEP & Confiabilidade .....	42
Gráfico 14 - Custo anual de Operação em função do BEP .....	43
Gráfico 15- Linha do tempo de Falhas e Suspensões / Celulose A .....	79
Gráfico 16 - Distribuição de Falhas e Suspensões / Celulose A .....	79
Gráfico 17 – Falhas por componentes / Celulose A .....	80
Gráfico 18 - Linha do tempo de Falhas e Suspensões / Celulose B .....	86
Gráfico 19 - Distribuição de Falhas e Suspensões / Celulose B .....	87
Gráfico 20 – Falhas por componentes / Celulose B .....	87

## LISTA DE ABREVIações

MTTF	Mean Time to Failures
MTBF	Mean Time between Failures
MTTR	Mean Time to Repair
LDA	Life Date Analysis
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
SECEX	Secretaria de Comércio Exterior
ABAF	Associação Baiana das Empresas de Base Florestal
APEX	Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos
BRACELPA	Associação Brasileira de Celulose e Papel
OPEX	Operational Expenditure
CAPEX	Capital Expenditure
ANSI	American Nacional Standard Institute
API	American Petroleum Institute

## 1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são descritas as principais considerações referentes a definição do tema, problemas e premissas que levaram a esse estudo, assim como a delimitação e estrutura deste trabalho.

### 1.1 TEMA

As bombas ao lado dos motores elétricos representam hoje um dos equipamentos mais utilizados no mundo. “Estima-se que mais de 10 bilhões de equipamentos estejam em uso na atualidade” (HEINZ P. BLOCH & ALLAN R. BUDRI, 2010, p.IV ).

Não existe uma terminologia homogênea sobre bombas, pois, há vários critérios para designá-las, entretanto, pode ser classificá-las em duas grandes categorias conforme figura 1:

- a) Bombas Cinéticas;
- b) Bombas Volumétricas ou Deslocamento Positivo;

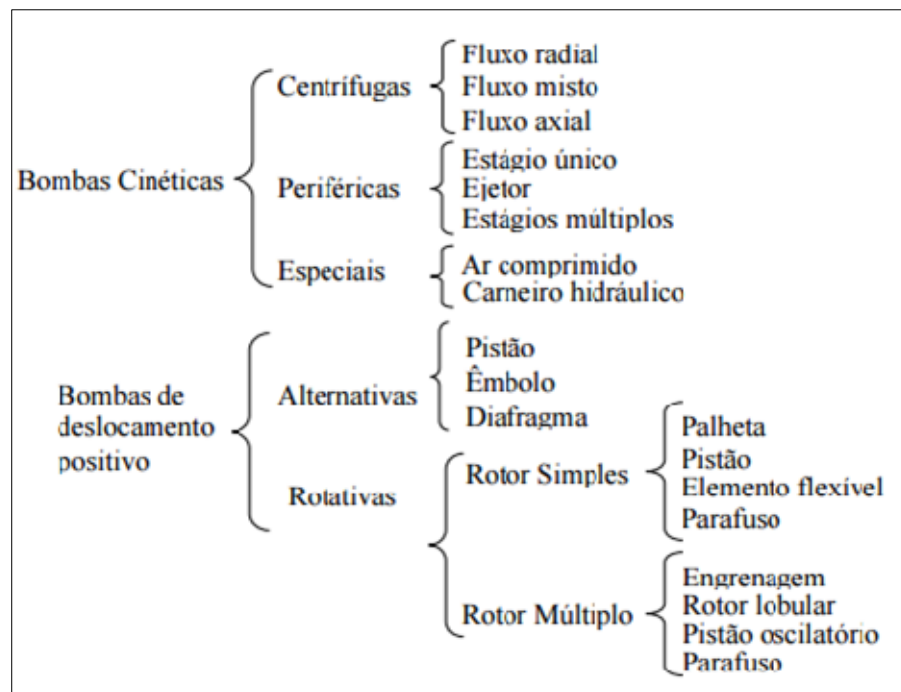
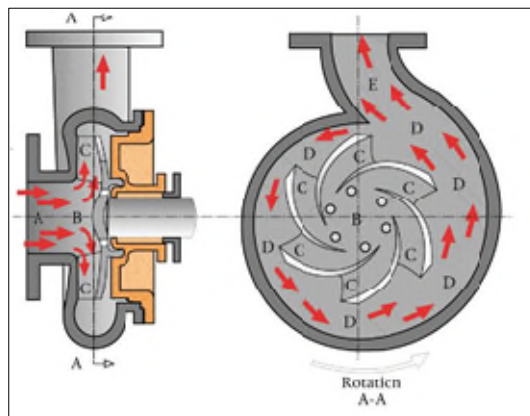


Figura 1 - Classificação geral das bombas.  
Fonte: Falco (2009).

Entre todas essas, as bombas centrífugas certamente compõem a grande maioria, por sua simplicidade e características de utilização.

As bombas centrífugas são turbo-máquinas que transferem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro. Recebem energia de uma fonte motora qualquer e cede parte desta energia ao fluido, sob a forma de energia de pressão, energia cinética, ou ambas. Conforme pode ser observado na Figura 2, existem diversas regiões e fases que regem o princípio de funcionamento das bombas centrífugas.



**Figura 2 - Princípio de funcionamento.**  
Fonte: Menin (2009).

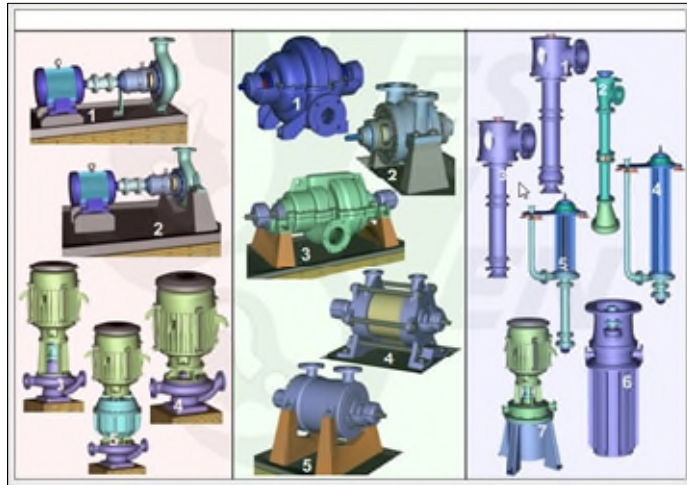
Na região A, da sucção da bomba e região B no centro do rotor, o fluido apresenta baixa velocidade e baixa pressão em conformidade com a disposição do sistema em que a bomba está instalada.

Nas aletas do rotor, na região C percebe-se um pequeno incremento da pressão e velocidade do fluido. Na região D dentro da voluta o fluido já apresenta alta pressão e baixa velocidade do fluido.

Finalmente na região E, na descarga da bomba o fluido apresenta alta pressão e baixa velocidade sendo transferido ao sistema.

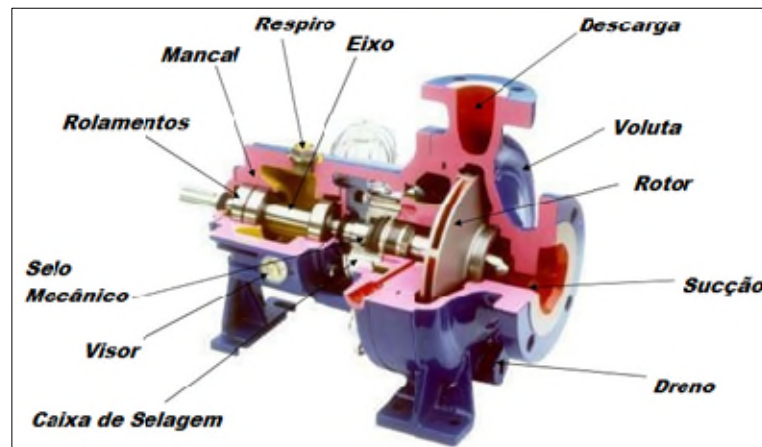
Embora as bombas centrífugas possam ter diversas configurações, formatos e tamanhos conforme apresentado na Figura 3, inevitavelmente irão obedecer ao mesmo princípio de funcionamento.





**Figura 3 - Tipos de bombas centrífugas.**  
**Fonte: Yesyen (2015).**

As bombas centrífugas em sua esmagadora maioria são equipamentos bem simples conforme pode ser observado na Figura 4.



**Figura 4 - Configuração básica das bombas centrífugas.**  
**Fonte: Menin (2009).**

Entre as principais partes destacam-se:

- Rotor, do qual conduz o líquido.
- Voluta, faz a contenção do líquido bombeado.
- Eixo, que gira o rotor da bomba.
- Mancais, tem a função de sustentar o eixo de acionamento.
- Selo mecânico, faz a vedação dinâmica do conjunto.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Apesar da simplicidade do equipamento ter tornado a aplicação da engenharia de confiabilidade um tema bastante difundido, mesmo nos dias de hoje é possível encontrar milhares de bombas que alcançam MTBF “*Mean Time Between Failure*” de um ano ou menos, enquanto outras em serviços idênticos atingem MTBF superior a oito anos.

Esse trabalho parte da premissa de que o não atendimento de algumas “*condições básicas e específicas*” de instalação e uso desses equipamentos seja a principal causa para o atingimento de baixos valores de MTBF.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Pelo fato das bombas centrífugas serem equipamentos amplamente utilizados na indústria, o objetivo geral desse trabalho é apresentar as melhores práticas de instalação e uso, e também os principais efeitos desses fatores causados na confiabilidade dos equipamentos.

### 1.2.2 Objetivo Específico

Também será apresentado um comparativo de métricas de confiabilidade, entre duas populações de equipamentos que se encontram instaladas em dois distintos e importantes fabricantes de Celulose, situados em uma mesma cidade da região centro-oeste do Brasil.

O objetivo dessa análise é conhecer as características de vida dessas populações de equipamentos e comparar se existem desvios nas práticas de instalação e uso.

### 1.2.3 Justificativa

Com base em experiências obtidas na indústria, bombas com baixa confiabilidade geram um alto custo de manutenção por apresentarem altas taxas de falha e baixa disponibilidade para operação.

### 1.2.4 Estrutura do trabalho

Este documento está dividido em cinco capítulos. Sendo que o primeiro capítulo, mostra uma breve definição sobre bombas centrífugas e os objetivos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma contextualização geral sobre a indústria de celulose, o momento econômico atual e a relevância das bombas centrífugas para o setor. Também serão abordados alguns pontos importantes sobre a confiabilidade desses equipamentos.

O capítulo 3 descreve os principais conceitos de confiabilidade empregados no trabalho. O capítulo 4 apresenta comparações das principais métricas de confiabilidade entre duas populações distintas de equipamentos. E o capítulo 5 traz a conclusão final do trabalho.

## 2 A INDÚSTRIA DE CELULOSE E AS BOMBAS CENTRÍFUGAS.

O objetivo nesse capítulo é apresentar todo o cenário que envolve o desenvolvimento desse trabalho.

### 2.1 INDÚSTRIA DE CELULOSE

O setor de celulose mundial vem passando por mudanças significativas nas últimas décadas, principalmente no que tange à sua localização, haja vista o deslocamento do centro produtivo dos países desenvolvidos para os países emergentes.

“O Brasil particularmente tem se destacado, sendo um dos países que mais expandiu a produção nas últimas três décadas e atualmente ocupa a quarta posição em volume de produção mundo” (BRACELPA - Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2015).

Essa posição foi alcançada graças ao know-how adquirido na produção de celulose de fibra curta, a partir do eucalipto ao longo das décadas de 70, 80 e 90, também pela disponibilidade de terras para o plantio de maciços florestais, o rápido crescimento e alto rendimento influenciados por estudos genéticos e condições ambientais, e aos baixos custos de mão de obra.

No quadro 1, segue o comparativo entre o rendimento dos principais produtores mundiais.

Espécies	Países	Rotação (anos)	Rendimento m <sup>3</sup> /ha/ano
Eucalipto	Brasil	7	44
Eucalipto	África do Sul	8-10	20
Eucalipto	Chile	10-12	25
Eucalipto	Portugal	12-15	12
Eucalipto	Espanha	12-15	10
Détula	Suécia	35-40	6
Détula	Finlândia	35-40	4

**Quadro 1 - Rotatividade e rendimento do eucalipto.**  
**Fonte: Poyry (2014).**

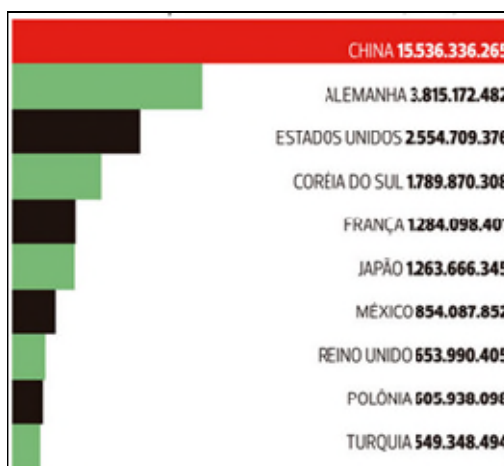
Essa evolução do setor vem ocorrendo de forma sustentável, que faz com que a biodiversidade, e os recursos hídricos sejam protegidos, contribuindo para sequestro de CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono, conservação do solo e restauração de terras degradadas.

Segundo BRACELPA, “no Brasil o setor de celulose e papel é composto por 220 empresas com atividades em 540 municípios, em 18 estados, gerando 128 mil empregos diretos e 640 mil empregos indiretos”.

Especialmente nos últimos três anos, chama atenção o planejamento e a implementação de novos grandes projetos no setor. A expectativa é que a capacidade produtiva do país irá elevar-se de 13,977 milhões de toneladas/ano para 19 milhões de toneladas/ano até 2020 onde mais de R\$ 50 bilhões devem ser investidos segundo estimativa da IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores.

O BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento estima que a escala mínima viável de uma nova planta de celulose chegue a 1 milhão t/ano, quase 7% da capacidade produtiva do setor no Brasil, somando investimento de cerca de US\$ 1 bilhão na área industrial. Atualmente o setor tem se beneficiado da valorização do câmbio já que exporta 90% da produção.

No gráfico 1, pode ser observado os maiores compradores mundiais da celulose brasileira.

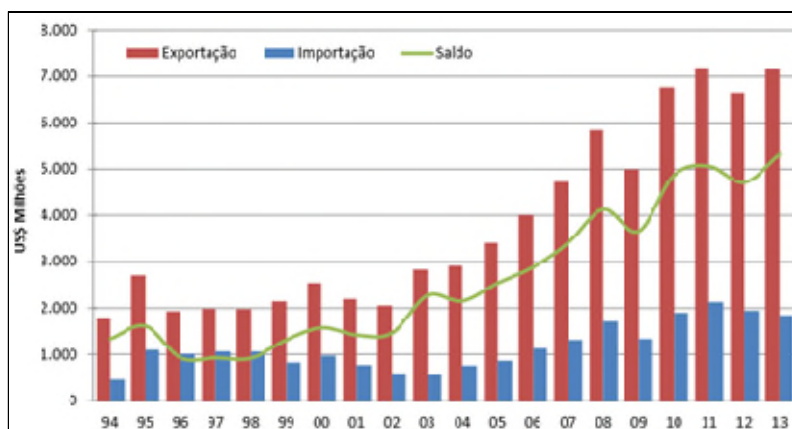


**Gráfico 1 - Os maiores compradores de celulose.**  
Fonte: ABAF /APEX (2014).

Segundo análises do Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos isso torna o setor muito cíclico, principalmente em função do longo período de maturação dos investimentos realizados no setor, e o crescimento da produção que

ocorre periodicamente e em grandes volumes, ao passo que a demanda não cresce na mesma proporção, levando o setor a desequilíbrios. Dessa forma, alternam-se períodos de preços elevados no mercado internacional e fases de margens comprimidas.

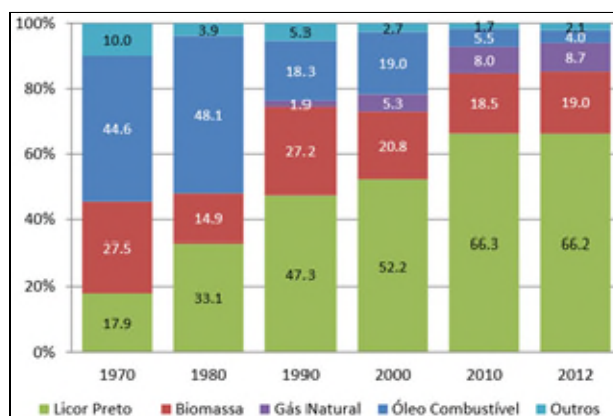
Conforme apresentado no Gráfico 2, o setor também tem contribuído significativamente com um saldo positivo na balança comercial do país.



**Gráfico 2 - Balança Comercial do Setor 1994 - 2013.**  
Fonte: SECEX - Secretaria de Comércio Exterior (2014).

Outra evolução importante do setor é que as unidades industriais têm se tornado mais intensiva no uso de energia térmica nas diversas etapas da produção de celulose e posteriormente na fabricação de papel.

No gráfico 3, segue representado a evolução da matriz energética do setor.



**Gráfico 3 - Matriz energética do setor.**  
Fonte: Bracelpa (2014).

Grande parte dessa demanda energética hoje é suprida por combustíveis provenientes do próprio processo, como o licor negro e biomassa florestal, e em muitos casos as unidades tem se tornados autossuficientes em energia e ainda comercializam o excedente produzido.

Isso tem influenciado em muito no modelo de negócio dessas empresas, e causado uma evolução na condução dos novos projetos, onde o OPEX "*Operational Expenditure*" passa a ser tão importante quanto CAPEX "*Capital Expenditure*" influenciando na aquisição de equipamentos mais caros, no entanto mais eficientes.

## 2.2 IMPORTÂNCIA DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Em síntese, nesse vultoso cenário as bombas centrífugas empregadas nesse setor têm se tornado cada vez maiores e mais importantes a cada projeto, tendo em vista que toda essa produção necessariamente passa por esses equipamentos, e uma simples falha pode representar grandes prejuízos.

Também o fato desses equipamentos atualmente consumirem aproximadamente 40% de toda a energia elétrica necessária para produção de celulose tendendo a ser mais eficiente e confiável quanto possível.

No próximo capítulo, segue os principais conceitos da engenharia de confiabilidade a ser aplicado no estudo das bombas centrífugas.

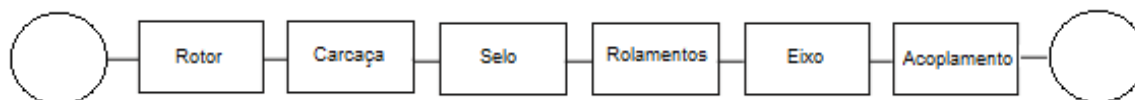
### 2.2.1 Novos Projetos

Atualmente os novos projetos no Brasil já atingem escalas de produção de até 1,75 milhões de toneladas/ano em uma única linha, e "existem fortes tendências para brevemente seja ampliado para até 2,25 milhões de toneladas ano" (Bracelpa,2015).

## 2.3 CONFIABILIDADE DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Devido a um grande número de tipos e aplicações de bombas centrífugas, alguns modos de falhas prevalecem em relação a outros para uma específica categoria de bombas.

Uma bomba centrífuga pode ser representada esquematicamente por um sistema em série conforme Figura 5. Assim, se qualquer componente falhar, então a bomba perde a função e inevitavelmente deve ser reparada.



**Figura 5 – RBD de uma bomba centrífuga.**  
**Fonte: Billinton R. (1983).**

A própria definição de confiabilidade admite que para o equipamento cumprir sua função, por um período estabelecido é necessário preservar determinadas condições de uso.

Sendo assim Heinz P. Bloch & Allan R. Budris (2010), apresenta “fatores de uso que influenciam diretamente na confiabilidade das bombas” e devem ser observados. Esses fatores são apresentados no Quadro 2.

Tipo	Instalação	Aplicação		Operação	Manutenção
Sucção Axial	Base	Mecânica	Hidráulica	Start-up	Treinamento
Dupla Sucção	Alinhamento	Selo	BEP	Parada	Ferramentas
Múltiplo Estágio	Configuração Tubulação	Rolamentos	RPM	Vazão Mínima	Estrutura
ANSI	Esforço Tubulação	Lubrificação	Diamêtro Rotor	Vazão Máxima	Histórico Dados
API		Eixo	Margem NPSH	Operação Paralelo	
Vertical		Acoplamentos	Energia Sucção		
			Energia Descarga		

**Quadro 2 - Fatores determinantes para confiabilidade das bombas**  
**Fonte: Adaptado Heinz P. (2010).**

Diversos desses fatores serão abordados a seguir nesse trabalho.



## 2.3.1 Tipos de Bombas Centrífugas

### 2.3.1.1 Sucção Axial

Constituem a grande maioria atualmente utilizada na indústria.

Sua principal característica é que o líquido entra diretamente no olho do rotor e a entrada e a saída possuem um ângulo defasado de 90° influenciando nos esforços radiais.

### 2.3.1.2 Dupla Sucção

As bombas de um estágio com rotores de dupla sucção são frequentemente consideradas equilibradas axialmente por simetria, reduzindo os esforços a serem absorvidos nos mancais, assegurando uma expectativa de vida útil mais longa dos rolamentos. Sua construção pode ser observada na Figura 6.



**Figura 6 - Bomba de Dupla Sucção.  
Fonte: Sulzer Pumps (2015).**

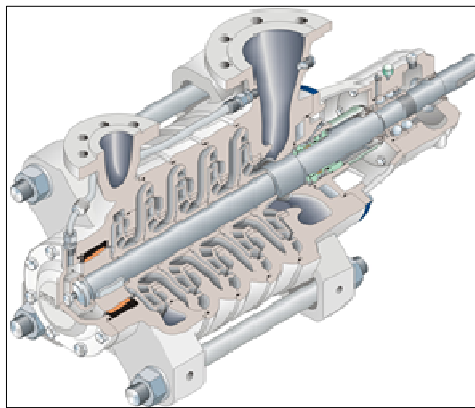
Geralmente utilizadas para grandes vazões e devido à divisão do escoamento em duas correntes, apresenta uma redução significativa do NPSH requerido.

### 2.3.1.3 Bombas multiestágio

Bombas multiestágio são usadas em instalações onde uma altura manométrica elevada é necessária.

Nesse caso, diversas fases são conectadas em série e o fluxo é guiado desde a saída de uma fase até a entrada da próxima, conforme Figura 7.

A altura manométrica final que uma bomba multiestágio pode proporcionar é igual à soma da pressão que cada estágio pode proporcionar.



**Figura 7 - Bomba múltiplos estágio**  
**Fonte: Sulzer Pumps (2015)**

A vantagem das bombas multiestágio é que elas proporcionam uma altura manométrica elevada em relação ao fluxo

### 2.3.1.4 Bombas API “*American Petroleum Institute*”

Por outro lado, as bombas API cumprem os requisitos do Instituto Americano do Petróleo Padrão 610. A Figura 8 apresenta um equipamento com construção típica API.



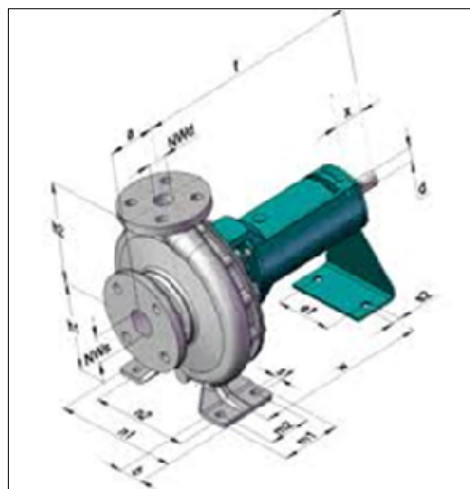
**Figura 8 - Construção típica API**  
**Fonte: Heinz P. Bloch, Allan R. Budris (2010).**

Trata-se de uma norma mais rígida e critérios muito específicos.

Este estilo é quase a escolha exclusiva para aplicações na indústria de refinaria de petróleo, onde ele lida com aplicações de maior temperatura e pressão de natureza mais agressiva que são comuns nas refinarias.

#### 2.3.1.5 Bombas ANSI “American National Standards Institute”

São projetadas e construídas para os padrões dimensionais do Instituto de Padrão Nacional Americano, prevendo a permutabilidade dimensional de um fabricante para outro. Na figura 9 pode se observar as principais dimensões padronizadas.



**Figura 9 – Construção típica ANSI.**  
**Fonte: Heinz P. Bloch, Allan R. Budris (2010).**

Esse padrão tornou-se o preferido por muitos usuários para aplicações de processos químicos, água e outros serviços menos agressivos.

No início de 2005, JohnCrane fabricante de selo mecânico, examinou diversos registros de reparo para um número de 15 plantas químicas e de refino de petróleo, a fim de obter dados significativos quanto ao MTBF para bombas centrífugas. Os resultados das pesquisas estão apresentados no Quadro 3 onde fica evidente a superioridade das bombas API.

<b>Bombas ANSI, valor médio, Estados Unidos</b>	<b>2,5 anos</b>
<b>Bombas ANSI, valor médio, Escandinávia, Indústria Papel e Celulose</b>	<b>3,5 anos</b>
<b>Bombas API, valor médio, Estados Unidos</b>	<b>5,5 anos</b>
<b>Bombas API, valor médio, Europa Ocidental</b>	<b>6,1 anos</b>
<b>Bombas API, melhor classe, Refinária, Califórnia -FIIA</b>	<b>9,2 anos</b>
<b>Bombas API, melhor classe, Planta petroquímica, Texas - EUA</b>	<b>10,1 anos</b>

**Quadro 3 - Comparativo de MTBF bombas ANSI e API.**  
**Fonte: Gordon Buck (2005).**

Cerca de 15.000 bombas foram incluídas na pesquisa. A menor destas plantas tinha cerca de 100 bombas; várias plantas tinham mais de 2.000 bombas.

### 2.3.2 Instalação das Bombas Centrífugas

#### 2.3.2.1 Base de Fundação

As bases de bombas centrífugas, na sua grande maioria são fabricadas em aço carbono ou ferro fundido e instaladas em uma fundação civil. A Figura 10 apresenta uma instalação de ótima qualidade onde se deve fazer o enchimento inclusive no interior da base metálica com argamassa.



**Figura 10 - Base de Fundação**  
**Fonte: Sulzer Pumps (2015).**

Podendo essas ter diversas disposições, mas com objetivo principal de suportar as cargas e esforços causados pela bomba garantindo rigidez contra torções, vibrações e planicidade ao equipamento.

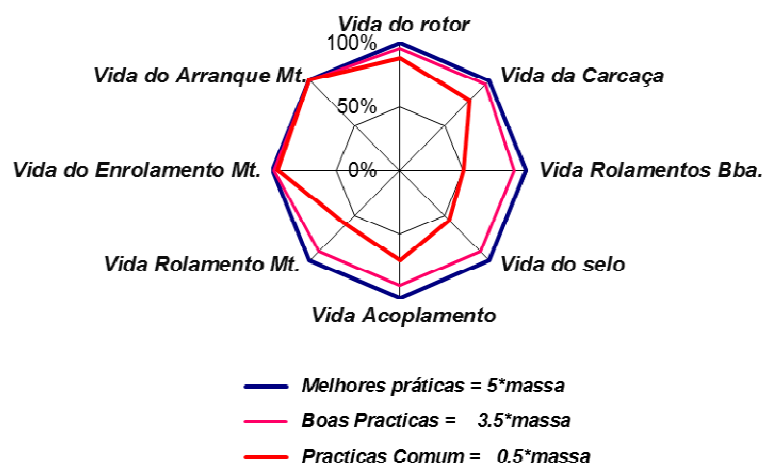
No decorrer desse trabalho serão apresentados os resultados de uma pesquisa realizada por Paul Barringer (1997) nos Estados Unidos, para quantificar como as práticas de instalação e uso afetam diretamente a vida das bombas centrífugas e seus componentes.

Participou da pesquisa experiente especialistas em equipamentos rotativos de todo o mundo. Esta pesquisa foi um dos poucos esforços para vincular como uma determinada prática afeta a quantificação da vida útil do componente.

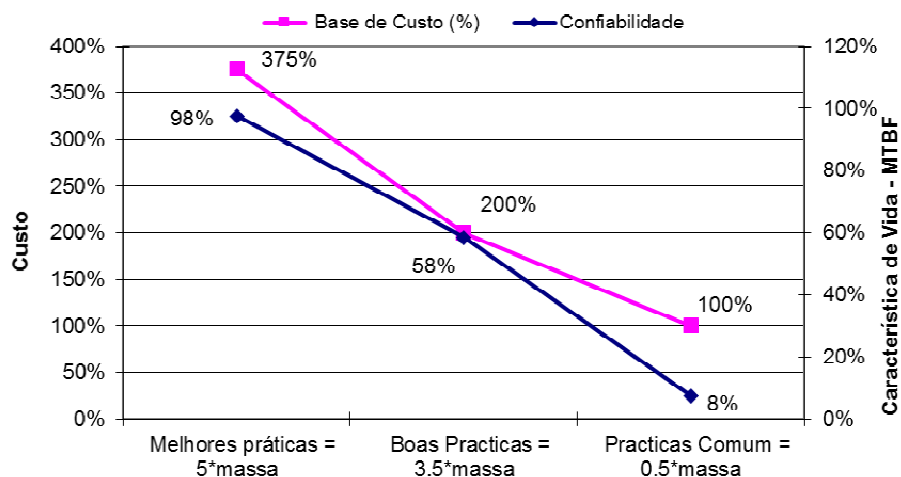
Vários fatores que afetam a confiabilidade das bombas foram considerados nessa pesquisa e classificados sempre de três formas:

- Melhores Práticas
- Boas Práticas
- Prática Comum

No caso das bases de fundação, conforme apresentado no Gráfico 4, os parâmetros da pesquisa foram classificados em função da proporção da fundação em relação a massa do equipamento.



O Gráfico 5, apresenta uma comparação entre as bases de custo para cada prática e os efeitos gerais causados na confiabilidade dos equipamentos.

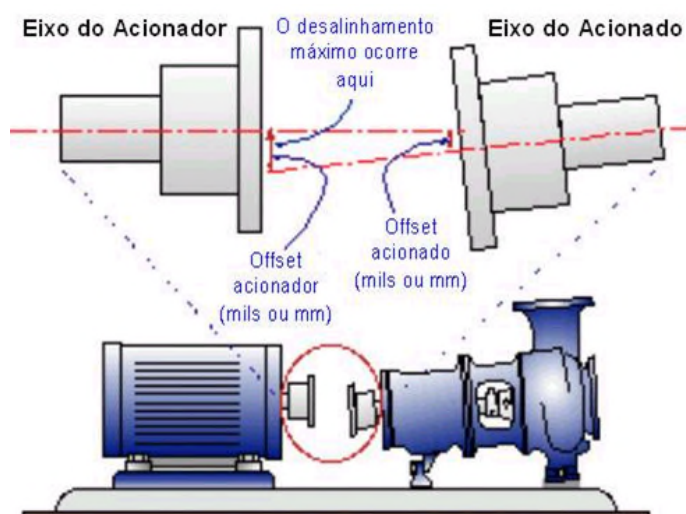


Dessa forma, é possível compreender que para manter as melhores práticas de instalação o custo é bastante elevado, no entanto os benefícios para confiabilidade do equipamento são bastante significativos.

### 2.3.2.2 Alinhamento

Em termos bem simples, o desalinhamento de eixos ocorre quando as linhas de centro dos eixos de rotação de duas (ou mais) máquinas não estão em linha um com o outro.

A Figura 11 apresenta os tipos de desalinhamento possíveis que ocorre na montagem das bombas.



**Figura 11 - Condição típica de desalinhamento**  
Fonte: Adaptado Heinz P. Bloch (2010).

Existem inúmeras técnicas e ferramentas para o alinhamento entre eixos, sendo que hoje em dia o alinhamento a laser é o mais utilizado nas indústrias.

No quadro 4, as tolerâncias permitidas de desalinhamento.

R P M	PARALELO		ANGULAR	
	ACEITÁVEL	ÓTIMO	ACEITÁVEL	ÓTIMO
600	0,10	0,08	0,07	0,05
750	0,09	0,07	0,06	0,04
1200	0,07	0,04	0,04	0,03
1800	0,05	0,03	0,02	0,02
3600	0,03	0,02	0,01	0,01

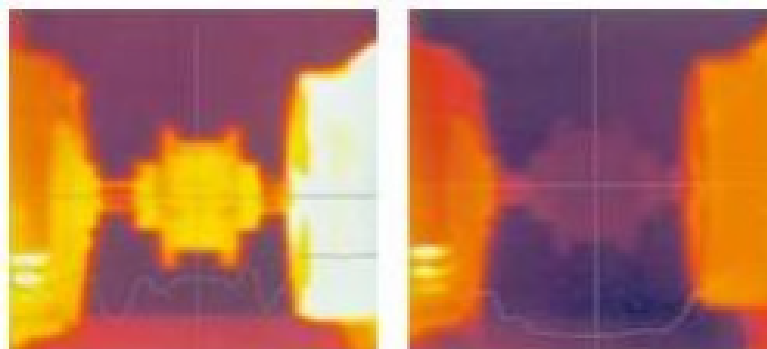
**Quadro 4 - Tolerâncias de desalinhamento.**  
**Fonte: Menin (2011).**

Abaixo as principais consequências geradas pela falta de alinhamento:

- Aumento dos níveis de vibração, o que acarreta vários outros problemas;
- Aquecimento e desgaste excessivo dos mancais;
- Maior desgaste dos elementos de vedação (selo mecânico e mancal)
- Desgaste prematuro do acoplamento;
- Alto consumo de energia;

Atualmente algumas das técnicas mais utilizadas para detecção dos sintomas de desalinhamento são as análises de vibração e termografia.

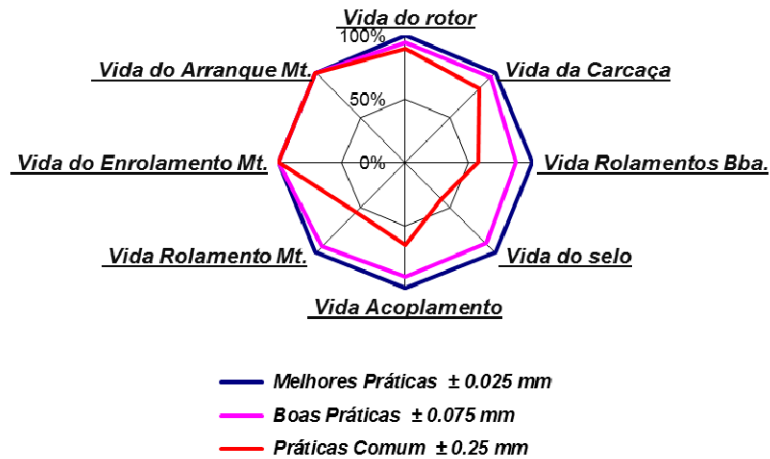
Na Figura 12 é possível verificar o elevado aquecimento ocasionado pelo desalinhamento.



**Figura 12 - Análise Termográfica**  
**Fonte: Heinz P. Bloch (2010).**

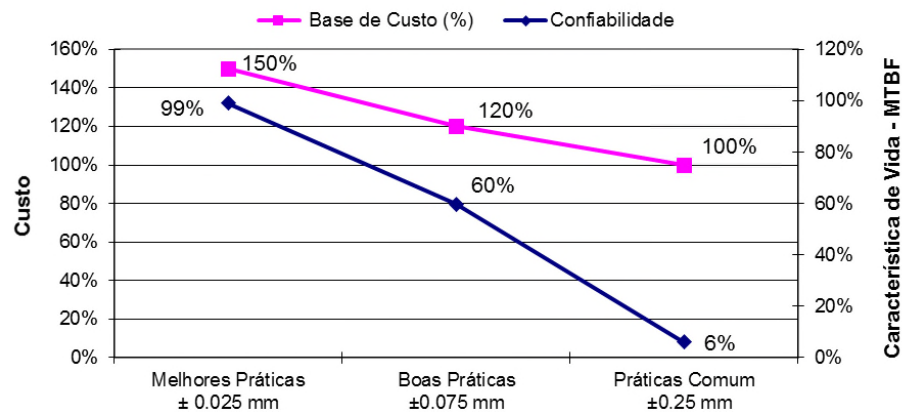
Conforme é possível observar no Gráfico 6, a vida do selo mecânico e rolamentos são os componentes mais prejudicados pelo desalinhamento entre eixos





**Gráfico 6 - Efeitos do desalinhamento na Vida dos Componentes**  
 Fonte: Adaptado de Paul Barringer (1997).

O Gráfico 7, apresenta uma comparação entre as bases de custo para cada prática de alinhamento e os efeitos gerais causados na confiabilidade dos equipamentos.

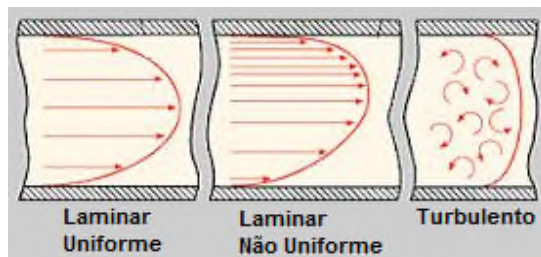


**Gráfico 7 - Relação do custo do alinhamento & confiabilidade**  
 Fonte: Adaptado de Paul Barringer (1997).

Se comparado com as bases de custo da base de fundação, pode-se observar que são relativamente menores as discrepâncias percentuais entre as práticas mais comuns e as melhores práticas.

### 2.3.2.3 Configuração da tubulação

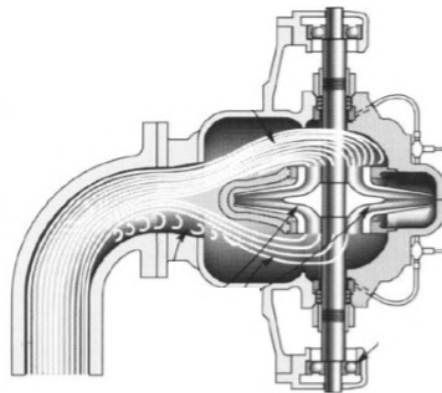
O funcionamento correto da bomba pode ser afetado por fatores externos como tubulação, reservatórios e válvulas. Por isso esses devem ser corretamente concebidos e montados no sistema. Isto é especialmente importante no lado da sucção da bomba, pois no geral as bombas devem ter um regime de fluxo sem interrupções e laminar uniforme em sua sucção conforme ilustrado na Figura 13.



**Figura 13 - Regime de fluxo.**  
**Fonte: Adaptado Heinz P. Bloch (2010).**

Perturbações na entrada do fluxo, tais como redemoinho, variações repentinas na velocidade ou desequilíbrio na distribuição de velocidades e pressões, são prejudiciais para o desempenho hidráulico e mecânico dos equipamentos.

Na Figura 14 apresenta os possíveis distúrbios causados na sucção de uma bomba.



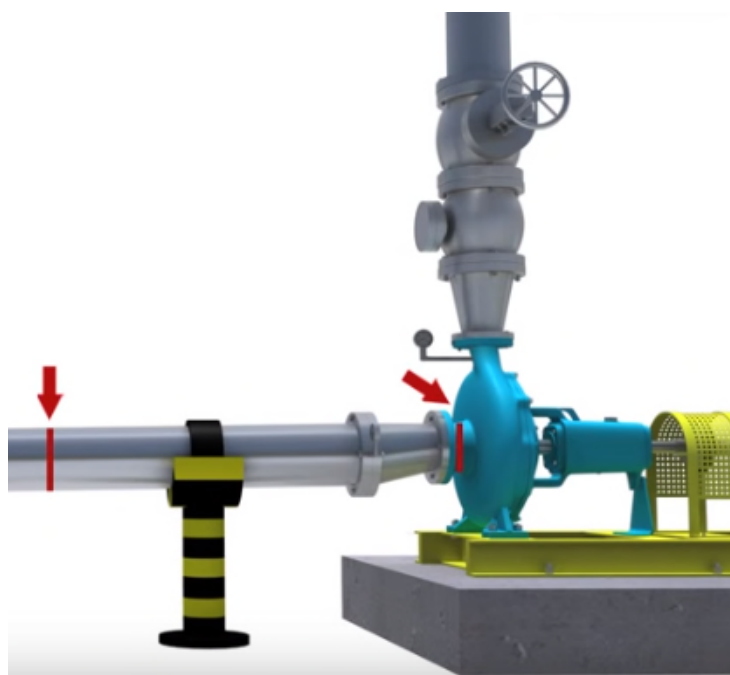
**Figura 14 - Influência hidráulica na sucção da bomba.**  
**Fonte: Heinz P. Bloch (2010).**

A velocidade na tubulação de sucção deve ser constante ou crescente a medida que o fluxo se aproxima da bomba, não sendo recomendado que seja superior a 2 metros por segundo.

As velocidades podem ser aumentadas no flange de sucção da bomba por meio de um redutor gradual. Redutores excêntricos geralmente devem ser instalados com o lado plano horizontal para cima e a parte inclinada para baixo a fim de evitar a formação de uma bolsa de ar.

As transições resultantes na desaceleração de fluxo na entrada da bomba não devem ser usadas.

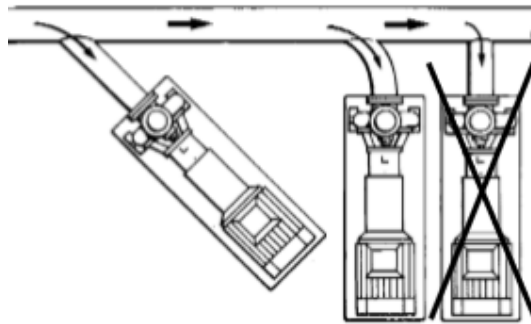
O diâmetro nominal do flange de sucção da bomba não determina o diâmetro nominal da tubulação de sucção. Normalmente usa-se comercialmente um diâmetro imediato superior ao bocal de sucção da bomba conforme ilustrado na Figura 15.



**Figura 15 - Diâmetro da tubulação de sucção.**  
Fonte: Heinz P. Bloch (2010).

Os padrões de fluxo mais perturbadores para uma bomba são aqueles que resultam da recirculação do líquido, que sofrem várias mudanças de direção em vários planos.

No caso de tubulação de sucção comum a duas ou mais bombas, devem evitar-se peças em T retas. Devem-se usar peças em flecha ou uma peça em Y para minimizar as perdas. A Figura 16 ilustra a melhor maneira para instalação de bombas em uma única tubulação de sucção.



**Figura 16 - Varias bombas em uma unica tubulação**  
**Fonte: Heinz P. Bloch (2010).**

Quando acessórios, tais como os encaixes "T" e cotovelos estão localizados muito perto da entrada da bomba, uma ação de "redemoinho" é induzida. Este redemoinho pode afetar negativamente o desempenho da bomba, reduzindo a eficiência, altura manométrica e NPSH disponível. Ele também pode gerar ruídos, vibração e danos em bombas energia de sucção.

Por isso que normalmente acessórios como válvula de bloqueio, curva, crivos usados na tubulação de sucção da bomba, devem ser dimensionados e localizados a partir de um comprimento mínimo para minimizar a perturbação do fluxo na entrada da bomba e reduzir as percas de carga.

Conforme ilustrado na Figura 17, alguns fabricantes recomendam que esse comprimento (L) seja em torno de 5 a 10 vezes o diâmetro (D) da tubulação.

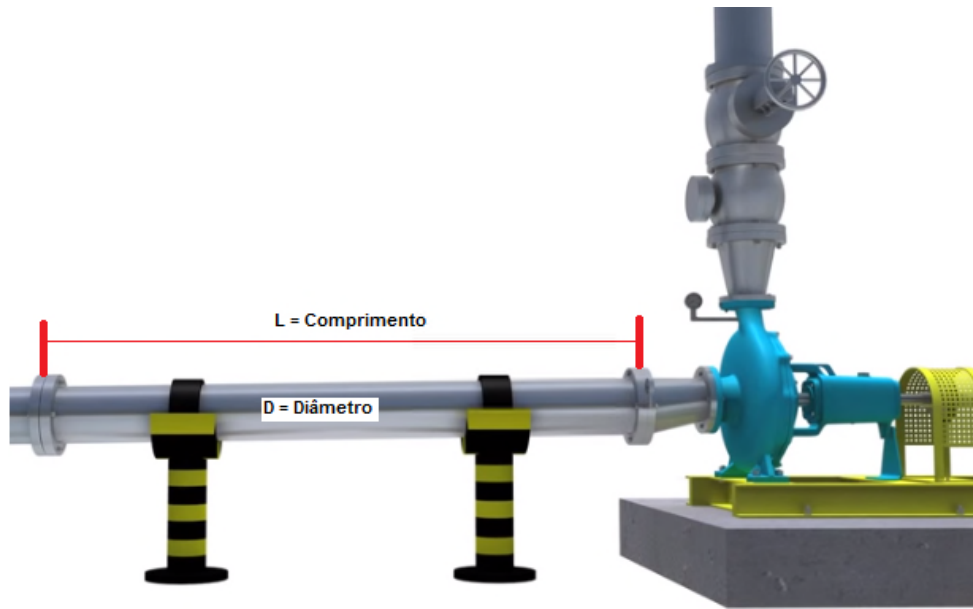


Figura 17 - Comprimento reto da tubulação de sucção  
Fonte: Heinz P. Bloch (2010).

Conforme apresentado no Gráfico 8, novamente os rolamentos e selo mecânico são os principais componentes prejudicados.

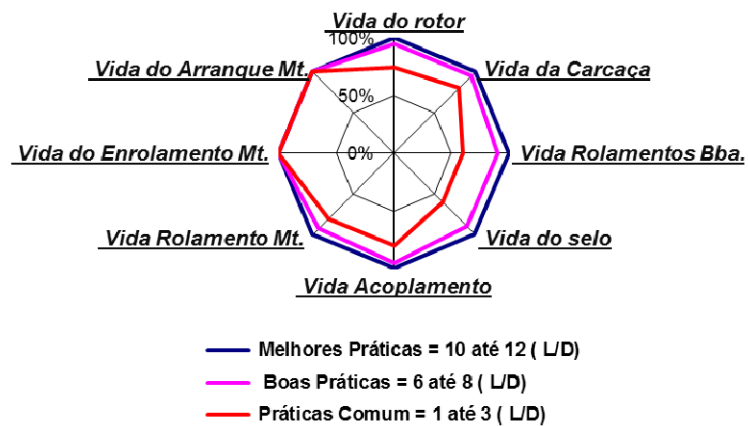
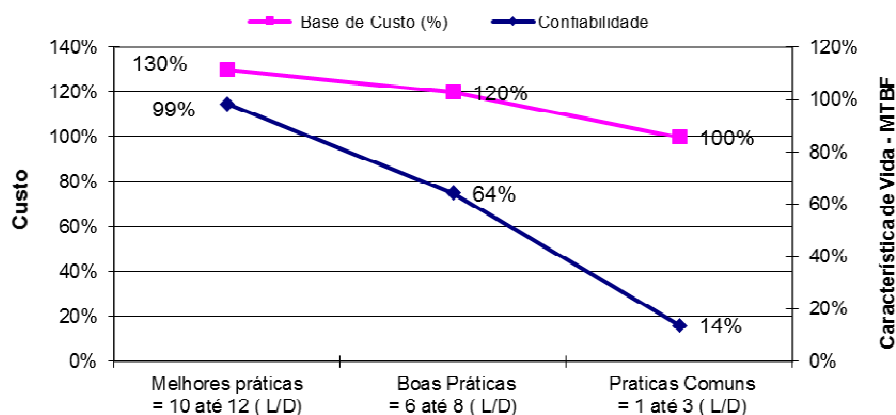


Gráfico 8 - Efeitos da tubulação na vida dos componentes  
Fonte: Adaptado de Paul Barringer (1997).

O Gráfico 9, apresenta uma comparação entre as bases de custo para cada prática de alinhamento e os efeitos gerais causados na confiabilidade dos equipamentos.



**Gráfico 9 - Relação do custo da tubulação & confiabilidade**  
 Fonte: Adaptado de Paul Barringer (1997).

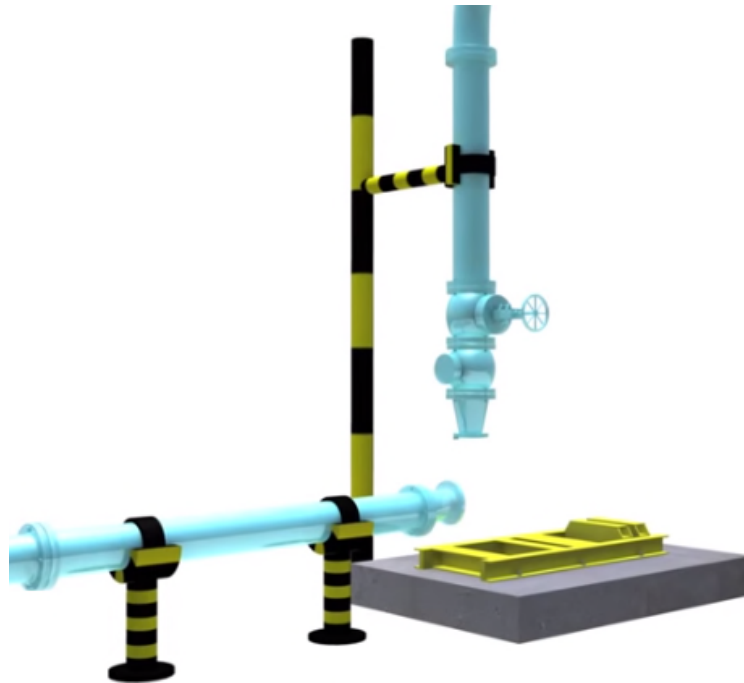
Quanto à tubulação de recalque, é necessária a instalação de uma válvula para regulagem da vazão e pressão de bombeamento.

É aconselhável instalar uma válvula de retenção entre a saída da bomba e a válvula de controle, quando o comprimento da tubulação de recalque for relativamente grande e a altura total de elevação for superior a 15 metros.

Quando o diâmetro da tubulação for diferente do diâmetro do flange de recalque, a ligação deverá ser feita através de uma redução concêntrica.

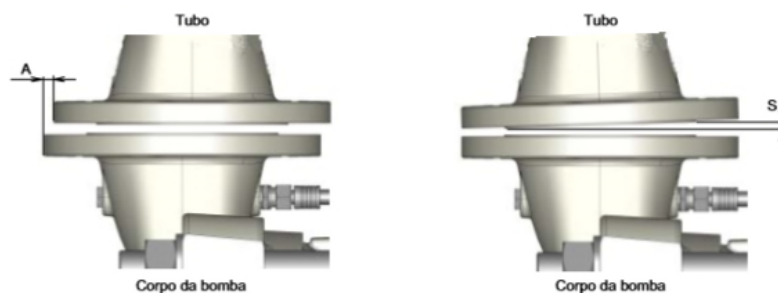
#### 2.3.2.4 Esforço nas tubulações

Os tubos devem ser instalados e apoiados para que as forças, vibração e o peso da tubulação não sejam direcionados para a bomba conforme ilustrado na Figura 18. No caso de fluido muito quente também é necessário considerar as influências na tubulação por dilatação térmica.



**Figura 18 - Tubulação suportada**  
**Fonte: Heinz P. Bloch (2010).**

Os desalinhamentos na tubulação podem ocorrer basicamente forma radial e angular conforme ilustrado na Figura 19.



**Figura 19 - Desalinhamento radial e angular**  
**Fonte: Sulzer Pumps (2015).**

Muitos fabricantes de bombas informam em seus manuais o desalinhamento máximo permitido nos flanges de montagem. Geralmente essas tolerâncias fazem referências ao diâmetro nominal da tubulação conforme apresentado no Quadro 5.

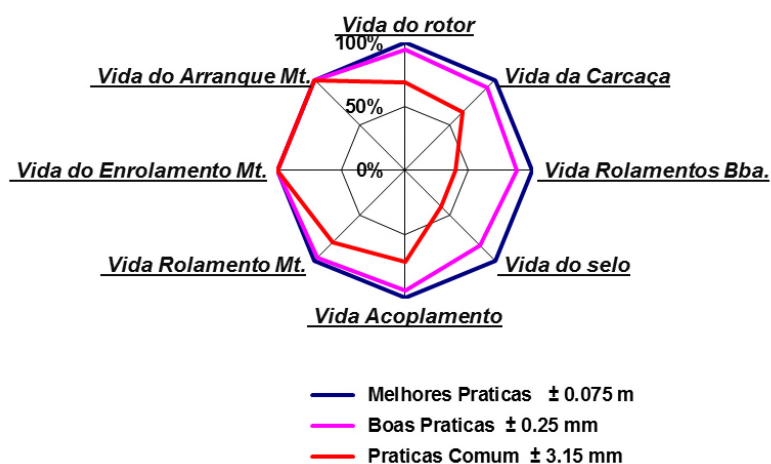
<b>Diâmetro Nominal do Flange</b>	<b>≤ DN 200</b>	<b>≥ DN 200</b>
<b>Desalinhamento Radial</b>	0,5 mm	0,5 mm
<b>Desalinhamento Angular</b>	0,2 mm	0,4 mm

**Quadro 5 - Tolerâncias permitidas de desalinhamento na tubulação**  
**Fonte: Sulzer Pumps (2015).**

Definitivamente as bombas não devem servir de apoio para a tubulação, os flanges da tubulação devem ser conectados ao da bomba totalmente livres de tensões, sem transmitir esforços a carcaça, evitando o desalinhamento e suas consequências.

Deve se prever juntas de expansão quando o líquido bombeado estiver sujeito a altas variações de temperatura.

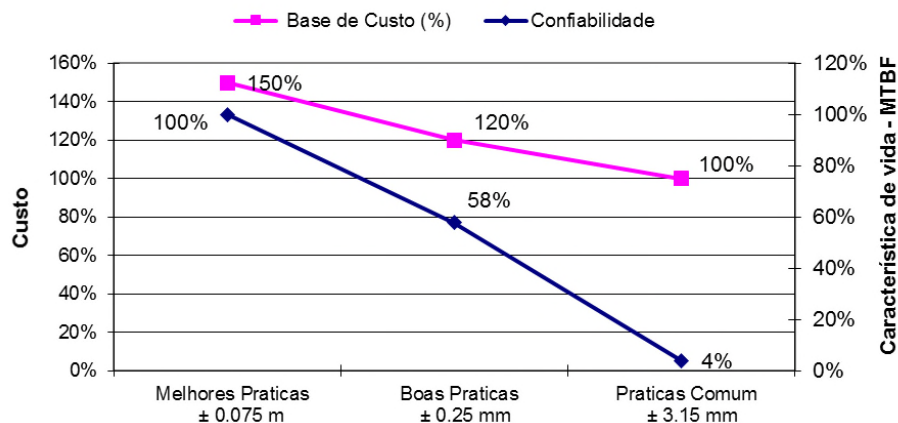
O Gráfico 10, apresenta os componentes mais afetados pelos esforços causados pelo desalinhamento e esforços causados pelas tubulações.



Nesse caso os rolamentos, selo e carcaça são os maiores prejudicados.

O Gráfico 11 apresenta a base de custo e os efeitos na confiabilidade.

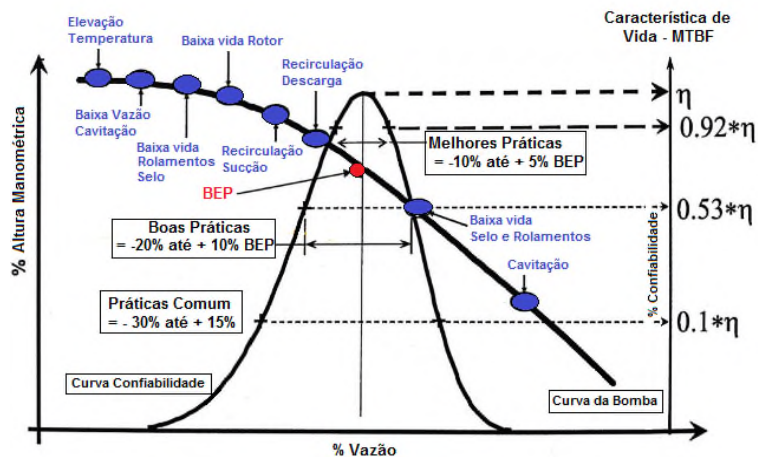




**Gráfico 11 - Relação do custo do desalinhamento & confiabilidade**  
 Fonte: Adaptado de Paul Barringer (1997).

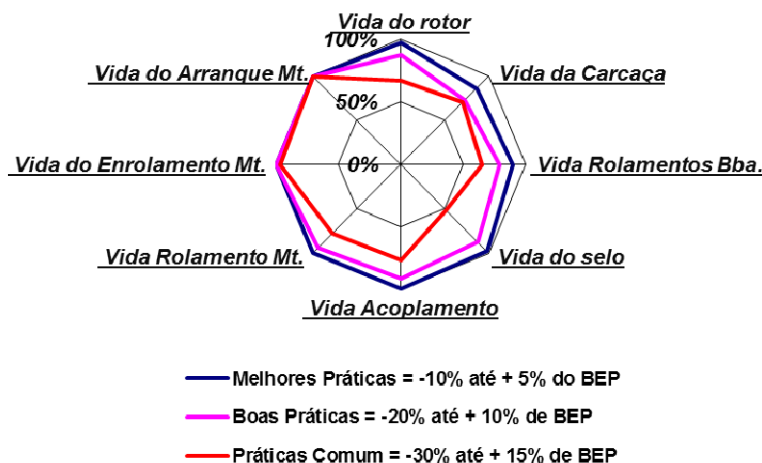
### 2.3.3 Melhor Ponto de Eficiência (BEP)

Em termos básicos, BEP identifica um ponto de funcionamento ou a área ao longo da curva de desempenho da bomba, onde a maior eficiência é obtida para um dado diâmetro do impulsor. À medida que o ponto de funcionamento de uma bomba se afasta do BEP, um desequilíbrio de pressão irá ocorrer no interior da bomba, o equipamento perde eficiência, desperdiça energia e apresenta diversos sintomas conforme apresentado na Figura 20.



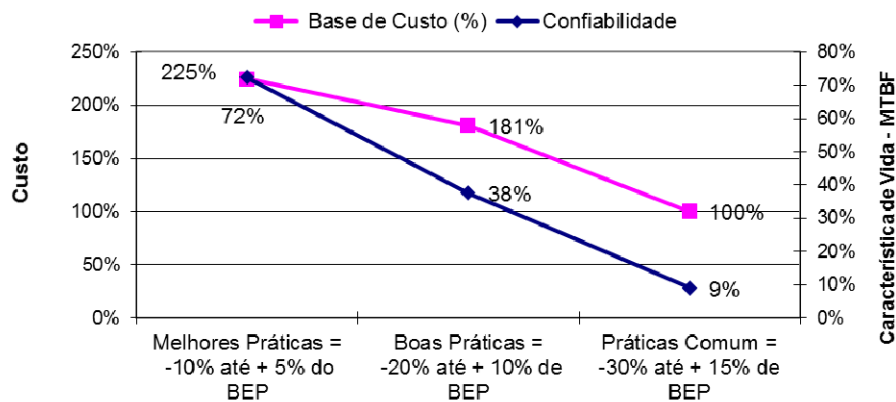
**Figura 20 - Sintomas e efeito na confiabilidade causado pelo BEP**  
 Fonte: Adaptado Heinz P. Bloch (2010).

Quanto mais energia é desperdiçada, mais aumentam a intensidade das forças destrutivas de modo que a confiabilidade é reduzida conforme Gráfico 12.



**Gráfico 12 - Efeitos do BEP na Vida dos Componentes**  
 Fonte: Adaptado de Paul Barringer (1997).

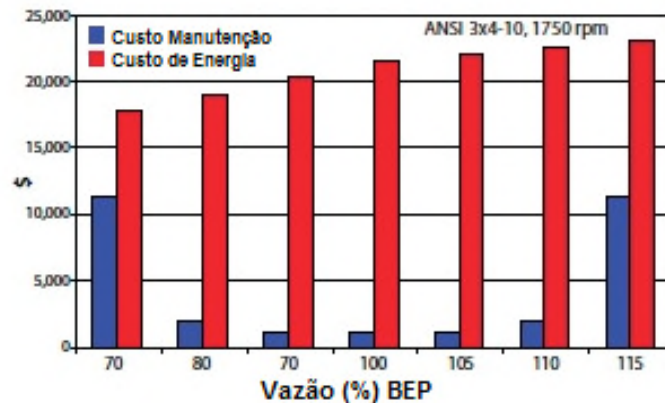
Este desequilíbrio pode causar deflexão do eixo, cargas excessivas nos rolamentos e selos mecânicos, vibração excessiva e aquecimento, os quais reduzem significativamente a vida útil da bomba e seus componentes. No gráfico 13 segue a base de custo relacionado com os efeitos da confiabilidade.



**Gráfico 13 - Relação do Custo do BEP & Confiabilidade**  
 Fonte: Adaptado de Paul Barringer (1997).

Geralmente os equipamentos são dimensionados para trabalhar com 100% do fluxo de projeto, mas muitas vezes poderia funcionar com bem menos fluxo.

No Gráfico 14, apresenta um elevado custo de manutenção a medida que o ponto de operação se afasta do BEP.



**Gráfico 14 - Custo anual de Operação em função do BEP**

Fonte: Adaptado Heinz P. Bloch (2010). Existem diversos métodos para controle de Vazão das bombas centrífugas.

Considerando que apenas 50% da vazão é necessária para determinado processo industrial considerando uma hora de operação, as opções seriam:

- Recircular 50% do fluxo, com custo de energia de 100% mantendo o ponto de operação próximo do BEP.
- Reduzir a vazão através de restrição da válvula, com custo de energia aproximado de 70% e afastando o ponto de operação do BEP.
- Manter o equipamento funcionando somente por 50% do tempo, com custo de energia de 50% mantendo o ponto de operação próximo do BEP.
- Reduzir a velocidade de rotação através de variador de frequência, com o custo de energia de 25% e pouco afastamento em relação ao BEP.

Usualmente pesquisas comprovam que a opção B é a mais empregada atualmente na indústria prejudicando significativamente a vida dos componentes da bomba e mantendo um consumo elevado de energia.

### 3 ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

Este item apresenta definições que serão utilizadas para desenvolvimento dos conceitos inerentes ao objetivo deste trabalho.

#### 3.1 CONFIABILIDADE

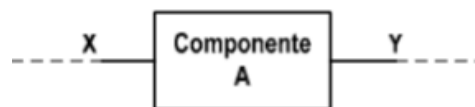
Segundo Elsayed (1996, p.36), “a confiabilidade de um equipamento pode ser definida como a probabilidade que desempenhe sua função durante um período estabelecido, sob determinadas condições de uso”.

É uma disciplina da engenharia, que aplica conhecimento científico para assegurar que um produto, sistema, componente ou serviço irá desempenhar sua função adequadamente pelo período de tempo requerido, dado um determinado ambiente. Sendo um processo estocástico, as incertezas ligadas aos parâmetros das funções devem ser consideradas. São necessárias massas de dados com tamanho e acuracidade suficientes.

Isso inclui projetar, construir, testar, usar, manter, e descartar um produto através do gerenciamento de seu ciclo de vida.

#### 3.2 COMPONENTE

É um bem tido como não reparável, isto é, um bem que depois de considerado em estado de avaria passa a resíduo. Se for destinado a uma única utilização designa-se como consumível. A Figura 21 apresenta um exemplo de modelização de um componente.



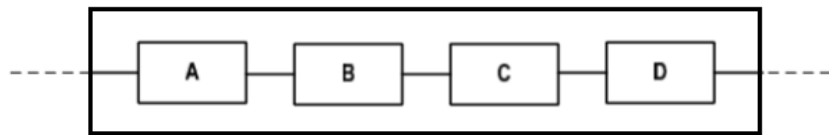
**Figura 21 - Representação de um componente.**  
**Fonte: Rui Assis (1997).**

O seu tempo de vida finito e as características de ciclo de vida de uma população de componentes podem geralmente ser representadas por distribuições padrão.

### 3.3 EQUIPAMENTO

Conjunto de componentes que operam para executar uma função específica.

Na Figura 22 segue um modelo de um equipamento composto por quatro componentes em série (se um componente falhar, o equipamento falha).



**Figura 22 - Representação de um equipamento com componentes em série.**  
Fonte: Rui Assis (1997).

É um bem reparável, ou seja, depois de passar ao estado de falha pode ser reparado e restituído de forma a perfazer as funções para as quais é requisitado.

É conveniente salientar que em todos os casos é importante definir o efeito da reparação no equipamento, que pode seguir dois modelos:

**AGAN** (As Good As New): O reparo, restitui o bem para a condição original;

**ABAO** (As Bad As Old): Apesar de o reparo poder restituir o funcionamento do equipamento, o “envelhecimento” ou desgaste é considerado.

### 3.4 SISTEMA

Conjunto mais complexo de equipamentos e componentes. A sua complexidade aumenta com o número de elementos que compõem o sistema.

### 3.5 FALHA

É a impossibilidade de um bem realizar uma função predeterminada. Seja este um componente, equipamento ou sistema.

Segundo Xenos (2004, p.62), “a análise de falha é fundamental para conhecer o comportamento dos equipamentos e permitir atuar no sentido de ações de melhoria contínua, eliminando-as ou reduzindo as suas consequências”. A hierarquização dessas falhas permite identificar quais se devem dispensar mais recursos.

### 3.6 MODOS DE FALHA

Maneira com que o sistema, item ou componente em estudo deixa de executar a sua função e desobedece às especificações.

### 3.7 FALHA PREMATURA

“Falha de um item devido a não conformidade da fabricação com o projeto ou com os processos de fabricação especificados” (Reliasoft Brasil).

### 3.8 FALHA ALEATÓRIA

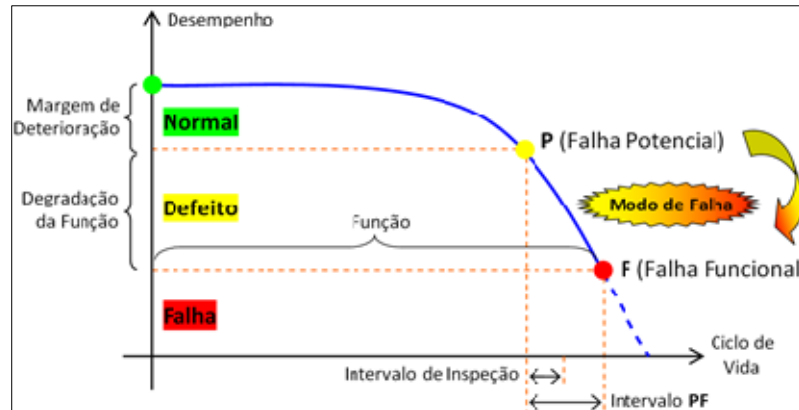
“Qualquer falha cuja causa ou mecanismo faça com que seu instante de ocorrência se torne imprevisível, a não ser no sentido probabilístico ou estatístico”. (Ref.: NBR 5462).

### 3.9 FALHA POR DESGASTE

“Falha que resulta de mecanismos de deterioração inerentes ao item, os quais determinam uma taxa instantânea crescente ao longo do tempo” (Reliasoft Brasil).

### 3.10 FALHA POTENCIAL

Conforme apresentado por Xenos (2004), o conceito de falha potencial, leva em conta o fato de “muitas falhas não acontecem repentinamente, mas se desenvolvem ao longo do tempo” conforme pode ser observado na Figura 23.



**Figura 23 - Falha potencial**  
Fonte: Rigoni (2014)

Pode-se identificar dois períodos distintos nas ocorrências de uma falha, sendo: Margem de deterioração e Degradação da função.

### 3.11 ORIGEM DAS FALHAS

Segundo Xenos 2004, existem muitas causas prováveis para as falhas nos equipamentos. Quando um projeto está correto, os equipamentos não apresentam falhas, pois o maior esforço é menor que a resistência mais baixa.

Na Figura 24, tanto o esforço quanto a resistência são variáveis que estão representadas por suas distribuições estatísticas de um valor médio.



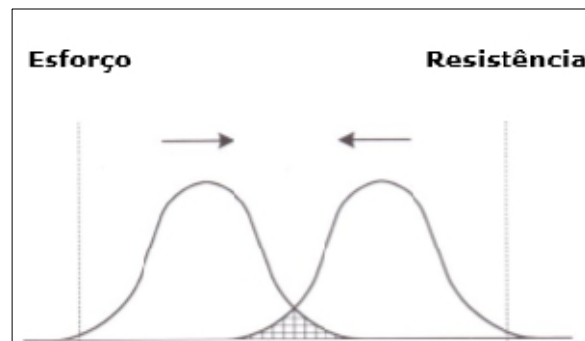
**Figura 24 - Relação entre o Esforço e a Resistência**  
 Fonte: Xenos (2004).

Se não houver sobreposição das distribuições, não haverá falhas.

Colocado de forma bem simples, existem três grandes categorias para as causas das falhas.

### 3.11.1 Falhas de projeto

As falhas de projeto ocorrem quando o projetista não consegue identificar as necessidades do cliente ou não consegue por falta de métodos, modelar de forma adequada o problema. Resumidamente, conforme representado na Figura 25 onde a resistência e o esforço foram incorretamente avaliados.



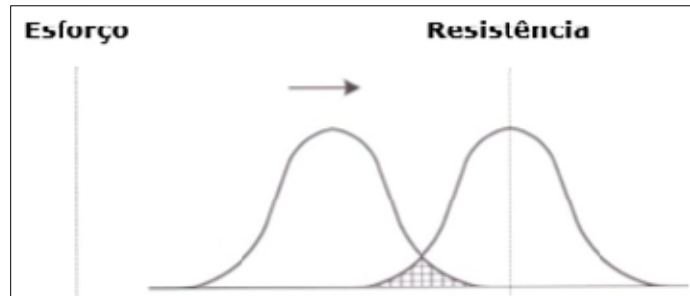
**Figura 25 - Esforço e Resistência incorretamente avaliados**  
 Fonte: Xenos (2004).

Nesse caso a falta de resistência, é uma característica do próprio equipamento, podendo ser ocasionado por erros na especificação de materiais, ou até mesmo deficiências no processo de fabricação e montagem.



### 3.11.2 Falhas por operação

Equipamentos submetidos a condições de operação, fora da especificação do projeto, e/ou fora do padrão, limites e procedimentos operacionais do fabricante, conforme ilustrado na Figura 26.

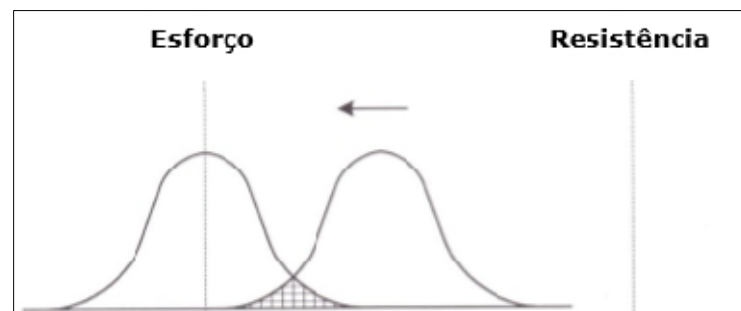


**Figura 26 - Aumento do Esforço**  
Fonte: Xenos (2004).

Antes de qualquer incremento na produção, que exceda as condições de projeto e/ou limites dos equipamentos, a melhor alternativa é consultar o fornecedor.

### 3.11.3 Falhas por manutenção

Assim que entram em operação, todos os equipamentos estão sujeitos a um grande número de esforços, que ao longo do tempo provocam sua deterioração, seja por fadiga, corrosão ou outros fatores conforme Figura 27.



**Figura 27 - Diminuição da resistência**  
Fonte: Xenos (2004).

As ações preventivas para evitar a deterioração dos equipamentos devem ser suficientes e devidamente tomadas.

Também deve-se considerar que uma vez que o projeto tenha sido adequadamente abordado, a fase de fabricação pode provocar falhas quando os processos de fabricação/montagem são inadequados, assim comprometendo também sua resistência.

Nas figuras 24, 25, 26 e 27 tanto o esforço quanto a resistência estão representados por suas distribuições estatísticas em torno de um valor médio.

Esta é uma situação bastante realista se levado em consideração as situações encontradas na prática.

Mas a resistência tende a diminuir devido a deterioração por fadiga, corrosão ou outros fatores e a distribuição estatística varia ao longo do tempo.

### 3.12 TEMPO MÉDIO PARA FALHAR (TMPF)

É o tempo para falha de componentes que não podem ser reparados. Também conhecido como MTTF "*Mean Time to Fail*".

### 3.13 TEMPO MÉDIO PARA REPARAR (TMPR)

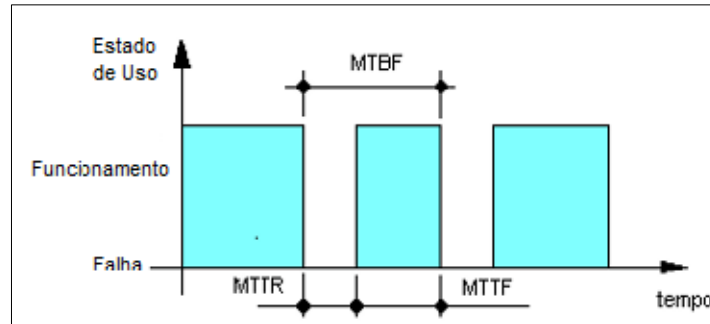
É o tempo para o reparo de componentes, obtido de uma amostra nas mesmas condições de uso do componente desejado. Também conhecido como MTTR "*Mean Time to Repair*".

### 3.14 TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (TMEF)

Também conhecido como MTBF "*Mean Time Between Fail*". O MTBF poderá ser considerado igual ao MTTF quando o MTTR for aproximadamente igual à zero. Agora quando MTTF for grande, o MTBF assume outro valor dado pela equação 1 e ilustrado na Figura 28.

$$MTBF = MTTF + MTTR.$$

(1)



**Figura 28 - Definição MTBF**  
**Fonte: Adaptado de Rui Assis (1997).**

Assim, desconsiderar o MTTR no cálculo do MTBF deve ser muito bem analisado, pois implica na revisão do conceito de disponibilidade.

### 3.15 MANTENABILIDADE

De acordo com NBR-5462 (1994), Manutenibilidade é uma característica inerente de um item relacionada com a habilidade de ser restaurado quando uma tarefa específica de manutenção é executada como solicitado.

### 3.16 SUPORTABILIDADE

Disciplina científica que estuda os processos, atividades e fatores relacionados com o suporte para um produto com os recursos necessários para a execução de uma tarefa de manutenção específica e o desenvolvimento de métodos para sua quantificação, avaliação, previsão e melhoria.

É uma característica inerente de um item relacionada com sua habilidade de ser suportado com os recursos necessários para a execução de uma tarefa específica de manutenção.

### 3.17 DISPONIBILIDADE

Segundo a NBR-5462 (1994), “disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado”, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, Manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

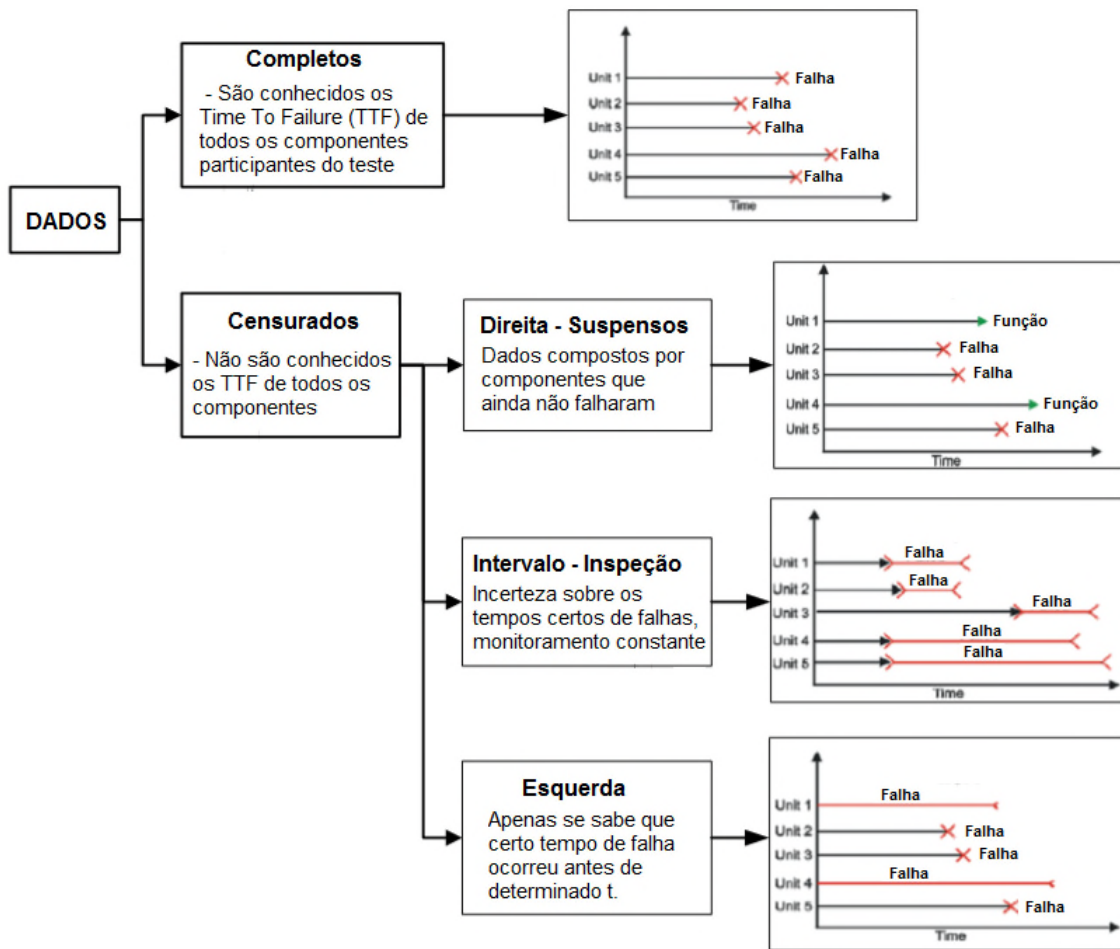
### 3.18 VIDA ÚTIL

Sob dadas condições, “é o intervalo de tempo desde o instante em que o item é colocado pela primeira vez em estado de disponibilidade”, até o instante em que a intensidade de falha torna-se inaceitável ou até que o item seja considerado irrecuperável depois de uma falha. (Ref.: NBR 5462)

### 3.19 DADOS

São todas as informações relativas ao tempo até às falhas e ações de manutenção, essas são necessárias e suficientes para a Análise dos Dados de Vida de componentes, equipamentos ou sistemas.

Na Figura 29, segue a classificação geral dos tipos de dados.



**Figura 29 - Classificação dos tipos de dados**  
 Fonte: Adaptado de Rui Assis, (1997).

Todos os tipos de dados na Figura 29 podem ser agrupados quando houver vários itens com o mesmo tempo ou intervalo.

### 3.20 ANÁLISE DOS DADOS DE VIDA

Ao realizar a análise de dados de vida, o objetivo é tentar fazer previsões sobre a vida de todos os produtos na população ajustando uma distribuição estatística (modelo) para dados de vida a partir de uma amostra representativa de unidades. A distribuição de parâmetros para o conjunto de dados pode então ser utilizada para estimar as características importantes da vida do produto, tais como a

confiabilidade ou a probabilidade de falha em um tempo específico, a vida média e a taxa de insucesso. Para uma análise de dados de vida, é necessário:

1. Reunir dados de vida do produto.
2. Selecionar uma distribuição de vida que tenha aderência aos dados e modelar a vida útil do produto.
3. Estimar os parâmetros que na distribuição dos dados.
4. Gerar gráficos e resultados que estimam as características de vida do produto, tais como a confiabilidade ou a vida signífica.

### 3.20.1 Tratamento dos Dados

A preparação dos dados é de extrema importância para uma análise bem-sucedida, ou seja, deve-se fazer uma análise correta dos dados na hora da coleta, originando confiança, representatividade e informações sem desvios.

O próximo passo é classificar que tipo de dados que está sendo trabalhado.

A maioria dos dados de Confiabilidade contém censuras (informações incompletas), assim os modelos e análises devem ser capazes de tratar esses casos.

Censuras também conhecidas como suspensões, são itens onde os tempos de falha só serão conhecidos quando excede se certos valores de tempo. As suspensões não adicionam tanta informação quanto os tempos de falha exatos, elas requerem especiais tratamentos estatísticos e não devem ser ignoradas.

### 3.20.2 Condições de Operação

Referem-se à adequação do ambiente de uso relativo às variáveis de projeto inicialmente fixadas. Essa condição necessita ser bem definida, dado que o sucesso de um evento pode não se manter, se as premissas anteriormente estabelecidas forem alteradas. É importante definir padrões de pressão, temperatura, umidade,

esforços, deformações, número de ciclos, distância percorrida etc., para garantir a confiabilidade inicialmente proposta.

### 3.21 MÉTODOS

#### 3.21.1 Método da Regressão (Mínimos Quadrados) - RRX

Segundo Devore (2006), “o objetivo de grande parte dos cálculos é investigar as variáveis que estão relacionadas deterministicamente”.

Afirmar que  $x$  e  $y$  estão relacionados, e desta maneira significa dizer que o conhecimento do valor de  $x$  implica no conhecimento exato do valor de  $y$ .

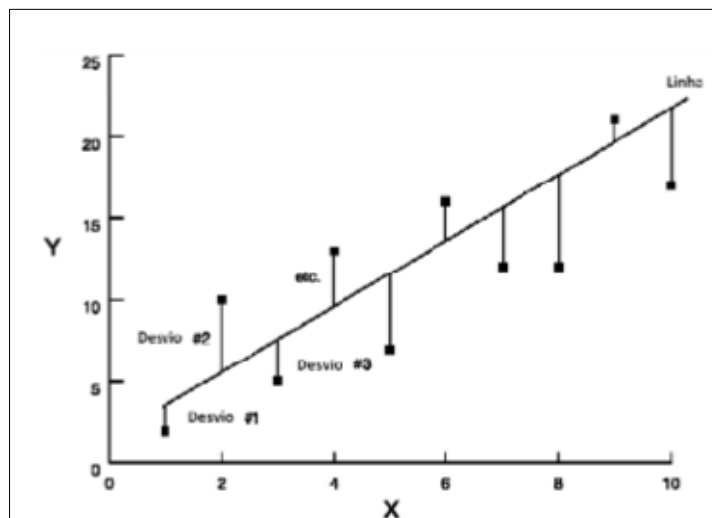
A análise de regressão é a parte da estatística que investiga a relação entre duas ou mais variáveis relacionadas de maneira não determinística (Devore, 2006).

Se duas variáveis não estiverem relacionadas deterministicamente, então para um valor fixo de  $x$ , o valor da segunda variável será aleatório.

Na maioria das vezes, a variável cujo valor é fixado será representado por  $x$  e será chamado de variável independente. “Para  $x$  fixo, a segunda variável será aleatória e a mesma é representada por  $y$  e será chamada de variável dependente ou resposta” (Devore, 2006).

Em geral, as observações serão feitas para inúmeros conjuntos da variável independente e terá como resposta os valores dependentes. A curva de regressão é definida pelo método dos mínimos quadrados.

Esse método definirá uma reta que minimizará a soma das distâncias ao quadrado entre os pontos plotados  $(X, Y)$  e a reta  $(X', Y')$ . Pelo método dos mínimos quadrados calculam-se os parâmetros “ $a$ ” e “ $b$ ” da reta que minimiza estas distâncias ou as diferenças (ou o erro) entre  $Y$  e  $Y'$ . A Figura 30, mostra de forma esquemática uma curva de regressão.



**Figura 30 - Curva de Regressão**  
**Fonte: Pyzedek (2003).**

Segundo Torres, Haddad e Ono (2009), “a reta de regressão que se obtém através do método dos mínimos quadrados é apenas uma aproximação da realidade, ela é um modo útil para indicar a tendência dos dados”.

### 3.21.2 Método da Máxima Verossimilhança – MLE

Conforme Ribeiro (2003), “a estimativa pelo método da máxima verossimilhança se baseia na função de verossimilhança da amostra, que expressa a probabilidade de se obter um conjunto de dados a partir de um determinado modelo de distribuição”. Esta função contém os parâmetros desconhecidos do modelo. Os valores destes parâmetros que maximizam a verossimilhança da amostra são conhecidos como estimativas de máxima verossimilhança MLE – “*Maximum Likelihood Estimates*”.

O método de estimativa de máxima verossimilhança é um procedimento analítico de maximização que se aplica a todas as formas de dados censurados ou completos e que apresenta propriedades desejáveis na análise de grandes amostras:



- À medida que o tamanho da amostra cresce, a estimativa se torna não tendenciosa.
- Intervalos de confiança e testes de hipóteses podem ser estabelecidos para os parâmetros, uma vez que a estimativa tende a uma distribuição normal.

No entanto para a utilização do método, tem alguns obstáculos importantes:

- Para amostras pequenas (menos de 10 falhas), a estimativa se torna altamente tendenciosa e métodos de correção devem ser aplicados.
- A solução das equações pode se tornar complexa, exigindo a utilização de programas estatísticos ou métodos iterativos em planilhas de cálculo.

### 3.21.3 Comparando os Métodos

O melhor método para estimação de parâmetros vai depender muito da situação, não há como predizer antecipadamente se é o método da regressão ou o da máxima verossimilhança o mais eficiente.

A regressão, através do coeficiente de correlação, apresenta uma boa medida de como os nossos dados se adequaram à distribuição escolhida.

Uma má adequação (coeficiente de correlação longe de  $\pm 1$ ) pode indicar a existência de múltiplos modos de falha. Isto é facilmente identificado olhando a adequação da linha aos dados (pontos) nos gráficos de modelos de regressão.

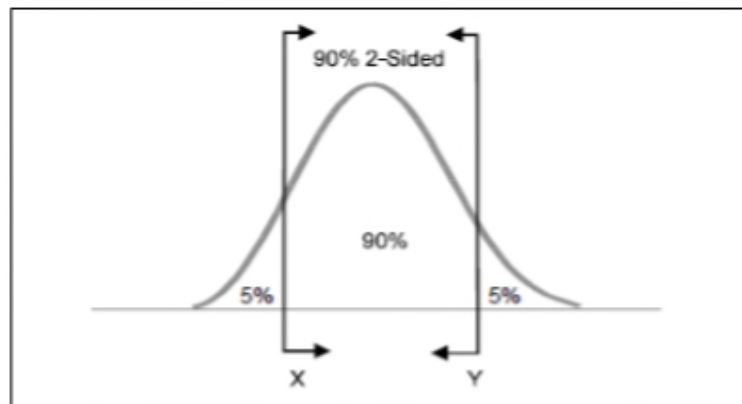
Quando usado o MLE, não é muito fácil identificar múltiplos modos de falha, a partir dos gráficos, pois não há o melhor caminho na plotagem pela solução com o MLE, ele suporta melhor dados com suspensões do que a regressão.

Baseado nas propriedades do MLE, os limites de confiança podem ser quantificados.

### 3.22 INTERVALOS DE CONFIANÇA

Intervalo de Confiança é um termo estatístico comumente empregado para designar a representatividade da amostra. É utilizada para se obter medidas de incerteza dos dados analisados. Quanto maior a amostra, menores e mais confiáveis serão os Intervalos de Confiança. Os Intervalos de Confiança podem ser:

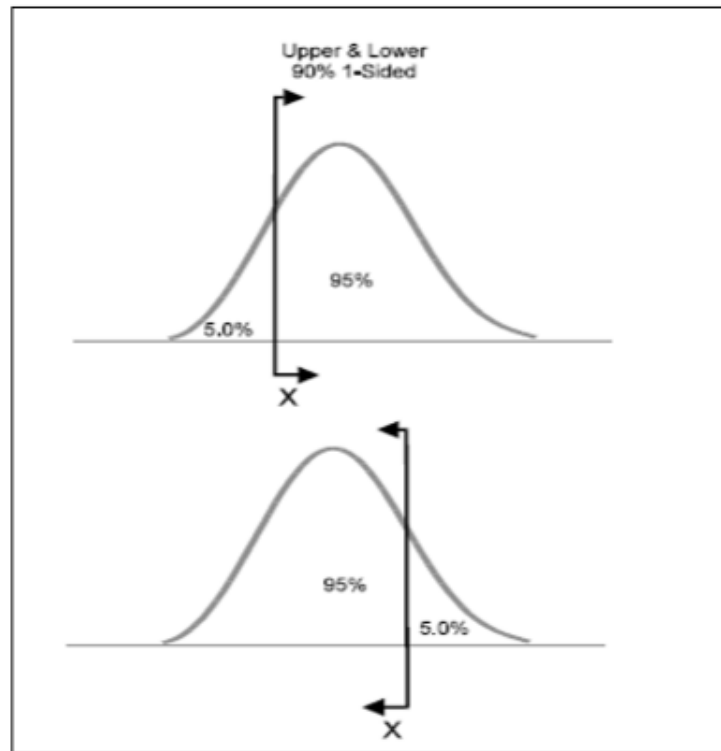
Bilaterais – Observação onde à maioria da população está situada conforme ilustrado na Figura 31.



**Figura 31 - Intervalo de Confiança Bilateral.**  
Fonte: Alessandro Birolini (2014).

Nesse caso quando utilizado 90% de confiança bilateral, está se dizendo que 90% da população estão entre X e Y.

Unilaterais – Observação da porcentagem maior ou menor (superior e inferior) de um ponto X conforme ilustrado na Figura 32.



**Figura 32 - Intervalos de Confiança Unilateral Inferior e Superior**  
**Fonte: Alessandro Birolini (2014)**

Para efeitos de confiabilidade, não é fator de preocupação se ela é maior do que a estimada, somente deve se preocupar com o limite inferior, portanto tende-se a utilizar o Limite Unilateral Inferior.

### 3.23 MÉTRICAS DA CONFIABILIDADE

De acordo com Assis (1997), “se considerado o ensaio de um grande número de componentes  $N_0$ , todos iguais, nas mesmas condições de operação, durante um intervalo de tempo  $t$ , os componentes apresentam ao longo do ensaio um valor de probabilidade de falha  $F(t)$  e de sobrevivência  $R(t)$ , tendo sempre em conta que  $F(t)$  tende a aumentar e  $R(t)$  a diminuir”.

Considerando que num dado momento  $t$ , existem  $N_s$  componentes que sobreviveram e  $N_f$  componentes que falharam, as respectivas equações 2 e 3 são referentes à probabilidade de falha  $F(t)$  e de sobrevivência  $R(t)$ .

$$F(t) = \frac{Nf(t)}{N0} \quad (2)$$

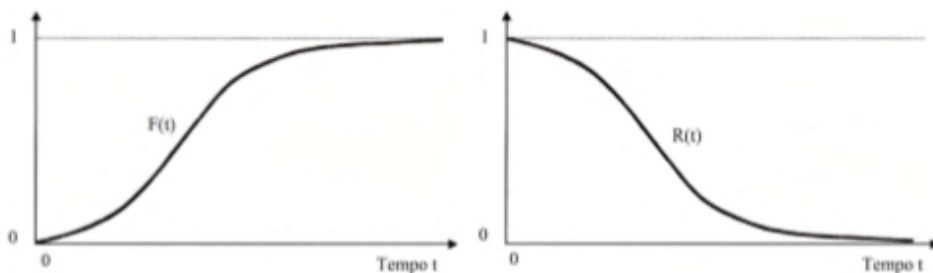
$$R(t) = \frac{Ns(t)}{N0} \quad (3)$$

Notar que as Equações 2 e 3 são aplicáveis quando todos os componentes seguem a mesma distribuição de probabilidade.

Sabe-se que as Equações 2 e 3 anteriormente apresentadas são complementares, conforme se verifica na equação 4.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (4)$$

Na Figura 33 são representadas as curvas referentes às funções  $F(t)$  e  $R(t)$ , verificando-se assim a sua complementação:



**Figura 33 - Representação das funções  $F(t)$  e  $R(t)$ .  
Fonte: Assis (1997).**

De acordo com a Figura 33, verifica-se que a função  $F(t)$  tende para o valor 1 quando  $t$  tende para infinito, assim como a função  $R(t)$  tende para o valor 0 quando  $t$ , tende para infinito.

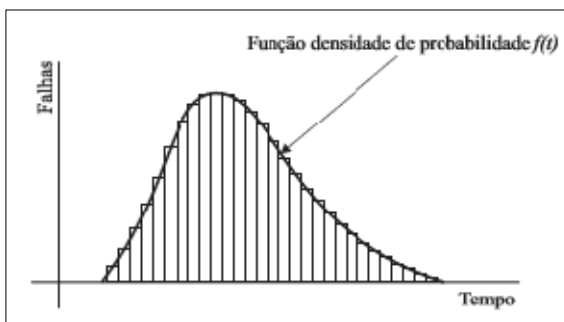
Se por outro lado fosse realizada a soma dos valores de cada instante das duas funções, a soma daria o valor 1, comprovando assim a relação apresentada na Equação 4.

### 3.24 FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE FALHA

Assim, com o objetivo de avaliar quantitativamente a confiabilidade, há que basear-se em modelos matemáticos que possibilitam estimar a probabilidade.

A partir de um histórico de falhas pode-se medir e avaliar a ocorrência das falhas e então decidir pela prevenção ou simplesmente acomodação das falhas. Para isso deve-se selecionar uma distribuição de probabilidade apropriada ao sistema a ser analisado. A função densidade de probabilidade representada na Figura 34 é relação entre a frequência de ocorrência das falhas e o tempo.

Ou seja, a distribuição das falhas no tempo.



**Figura 34 - Função densidade de probabilidade.**  
**Fonte: Bertsche (2008).**

Na Figura 34 está apresentada uma função densidade de probabilidade hipotética, onde é possível observar que, com um número suficientemente grande de sistemas (ou componentes) testados até a falha, ou de dados coletados em campo, pode-se estabelecer uma curva que representa o comportamento geral do sistema.

Na ordenada distribuem-se as falhas e na abcissa o tempo em que as falhas ocorreram.

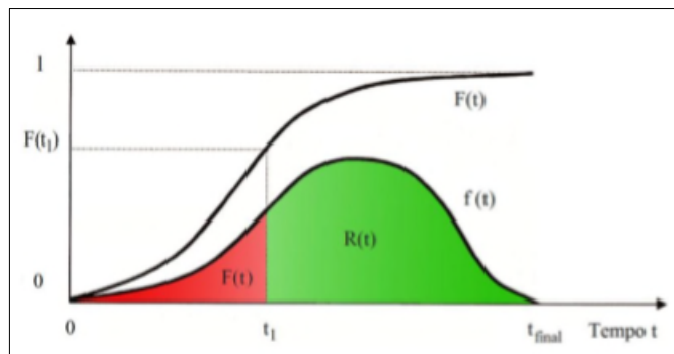
A porcentagem de itens que não falharam até o “instante  $t$ ” corresponde à confiabilidade, que pode ser calculada conforme equação 5 como:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (5)$$

A função não-confiabilidade (também chamada de probabilidade acumulada de falha), por sua vez, é uma função crescente que representa a frequência acumulada das falhas em um dado instante  $t$ , ou seja, a porcentagem de itens que falharam até o instante  $t$ . Tal função é obtida a partir da integração da função densidade de probabilidade conforme Equação 6.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (6)$$

A Figura 35 fornece uma representação visual que se refere à função de probabilidade de falha  $F(t)$ , a função densidade de probabilidade de falha  $f(t)$ , bem como as áreas referentes à  $F(t)$  e a  $R(t)$  para um dado tempo genérico  $t_1$  e  $t_{\text{final}}$ .



**Figura 35 – Representação de  $F(t)$ ,  $R(t)$  E  $f(t)$ .  
Fonte: Assis (1997)**

Pode se observar, para um dado instante  $t$ , que  $R(t)$  é complementar à  $F(t)$ .  
Utilizando as equações 5 e 6 obtém-se a equação 7 referente a  $R(t)$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t).dt \quad (7)$$

Observando a equação 7, pode se notar que  $R(t)$  caracteriza a probabilidade do componente operar sem falhas até ao momento pretendido  $t$ , assim como  $F(t)$  caracteriza a probabilidade do componente falhar até ao momento pretendido.

### 3.25 A TAXA INSTANTÂNEA DE FALHAS

A função taxa instantânea de falhas, muitas vezes referenciada como função de risco (“Hazard Rate”) ou  $\lambda(t)$ , representa uma função de densidade de probabilidade que traduz a taxa pela qual se verifica a falha por unidade de tempo dos componentes em operação, no momento, em relação ao número de componentes que sobreviveram até esse mesmo momento.

“É a frequência com que as falhas ocorrem, num certo intervalo de tempo, medida pelo número de falhas para cada hora de operação ou número de operações do sistema ou componente” (Lafraia, 2001). A taxa de falha é dada pelo número de componentes que falharam em um dado intervalo de tempo, em relação ao número total de componentes expostos às falhas, de acordo com a Equação 8.

$$\lambda(t) = \frac{\text{número\_de\_falhas\_na\_unidade\_de\_uso}}{\text{número\_de\_componentes\_exposto\_a\_falha}} \quad (8)$$

A taxa de falha também pode ser relacionada com a função densidade de probabilidade e a confiabilidade, obtendo-se a Equação 9.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (9)$$

### 3.26 DISTRIBUIÇÕES USADAS EM CONFIABILIDADE

“As distribuições de probabilidade, mais utilizadas para a determinação da confiabilidade, são divididas em dois grupos” (Billinton e Allan, 1983).

Distribuições discretas.

Distribuições contínuas.

### 3.26.1 Distribuições Discretas

As distribuições discretas são as que representam eventos discretos cujas saídas podem ser, por exemplo: cara - coroa, passa - não-passa, sucesso – insucesso, bom – ruim, quente – frio, etc. “Na literatura que trata de confiabilidade é comum encontrar a distribuição desse tipo como a de Bernoulli, Binomial e Poisson” (Ireson et al., 1996).

### 3.26.2 Distribuições Contínuas

As distribuições contínuas medem eventos que se desenvolvem ao longo de uma variável aleatória contínua como: tempo, número de ciclos, processo de deterioração química, radiação, entre outras. São clássicas, nesse campo do conhecimento as distribuições Normal ou Gaussiana, Lognormal, Exponencial e Weibull.

É importante entender que cada distribuição de probabilidade pode gerar diferentes estimativas para as características de durabilidade do produto. Dessa forma, a utilização de um modelo inadequado levará a erros grosseiros de estimativas. Portanto, a escolha de um modelo adequado para descrever o tempo de falha de um determinado produto deve ser feita com bastante cuidado.

## 3.27 MODELOS PROBABILISTICOS

Para determinar a fase do ciclo de vida em que o equipamento se encontra e estimar a disponibilidade do mesmo, é necessário obter modelos probabilísticos, tanto para os tempos entre falhas, como para os tempos até os reparos.

Existe uma série de distribuições probabilísticas utilizados na análise de dados de confiabilidade, mas alguns dessas distribuições ocupam uma posição de destaque por sua comprovada adequação a várias situações práticas.

Entre esses modelos pode ser citado o Exponencial, Weibull e o Log-normal.



### 3.27.1 Distribuição Exponencial

A distribuição Exponencial é importante em estudos de confiabilidade por ser a única distribuição contínua em função do risco constante (Fogliatto, 2009), é a única distribuição com esta propriedade.

É um modelo apropriado para descrever a vida de sistemas complexos, como máquinas, e equipamentos constituídos de diversos itens. Ela é considerada uma das mais simples em termos matemáticos.

Sua função de densidade de probabilidade de falha é dada na Equação 10.

$$f(t) = \lambda \exp^{-\lambda t} \quad (10)$$

A função de confiabilidade  $R(t)$ , que é a probabilidade do produto continuar funcionando além do tempo  $t$  é dada na Equação 11.

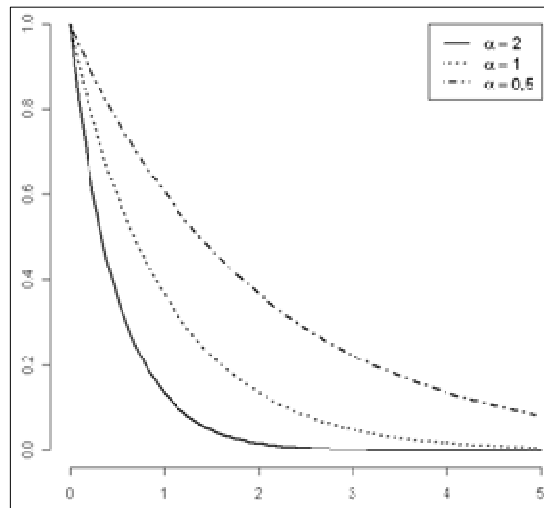
$$R(t) = \exp^{-\lambda t} = \exp^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (11)$$

A função de probabilidade acumulada de falha, após o tempo  $(t)$  de funcionamento, é dada na Equação 12.

$$F(t) = 1 - \exp^{-\lambda t} \quad (12)$$

As falhas ocorrem de forma aleatória, não apresentando uma tendência de crescer ou decrescer no período considerado. Devido a isso o acompanhamento da falha deve ser feito a partir da predição, uso de sensores, ou simplesmente deixar falhar.

É para os itens que apresentam essa tendência que ações corretivas ou preditivas se tornam processos adequados de manutenção, incluindo aí a manutenção centrada na confiabilidade. Na Figura 36 pode-se observar a PDF variando em função de  $\alpha$ .



**Figura 36 – PDF Exponencial.**  
**Fonte: Portal Action (2015).**

Podendo ser o MTBF calculado pela Equação 13.

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (13)$$

### 3.27.2 Distribuição Log-Normal

Essa distribuição é mais versátil do que a distribuição Normal, pois tem uma forma mais variada, o que possibilita melhor ajuste da população em comportamentos assimétricos de dados de vida, “é muito utilizada em modelagem de tempos até o reparo, ciclos até a falha por fadiga, resistências de materiais, e no projeto probabilístico com cargas variáveis” (Assis, 1997).

Uma variável aleatória ( $t$ ) é Lognormalmente distribuída se o seu logaritmo natural ou neperiano ( $t' = \ln t$ ) é normalmente distribuído.

A distribuição Lognormal trata-se de uma distribuição assimétrica, tendendo para uma simetria para baixos valores de desvio padrão.

De um modo geral, esta distribuição ajusta-se a casos que apresentem como modo de falha principal a fadiga.

A função densidade de probabilidade de falha para a distribuição Lognormal é dada pela Equação 14.

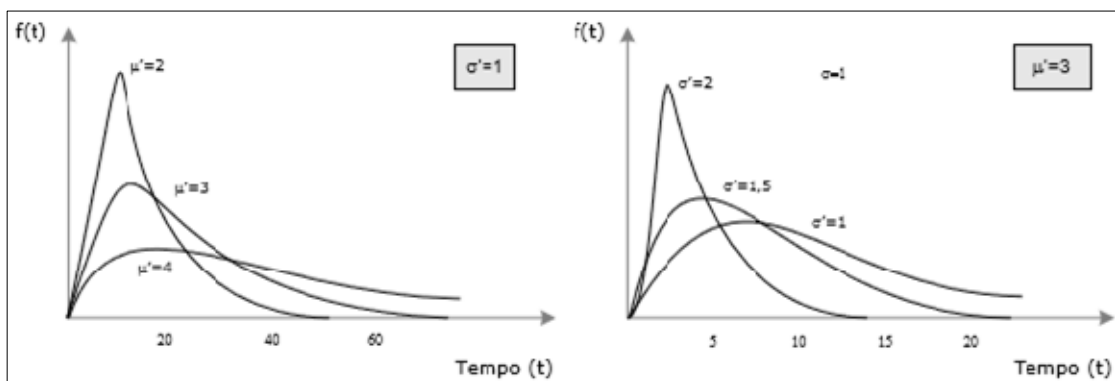
$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{[\ln(t)-\mu']^2}{2\sigma'^2}\right] \quad (14)$$

Onde:

$\mu'$  = Valor médio do logaritmo natural dos tempos até à falha;

$\sigma'$  = Desvio padrão do logaritmo natural dos tempos até à falha;

A função densidade de probabilidade de falha referente à distribuição Lognormal pode ser representada graficamente, conforme Figura 37, verificando se a influência da média ( $\mu'$ ) e a influência do desvio-padrão ( $\sigma'$ ).



**Figura 37 - Função densidade para distribuição Lognormal.**

**Fonte: Sobral, 2010**

A função de confiabilidade  $R(t)$ , que é a probabilidade do produto continuar funcionando além do tempo  $t$  é dada pela Equação 15.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi\left[\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right] \quad (15)$$

A função de probabilidade acumulada de falha, após o tempo (t) de funcionamento, é dada pela Equação 16.

$$F(t) = \Phi \left[ \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\left[ \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right]} \exp \left( -\frac{z^2}{2} \right) dz \quad (16)$$

### 3.27.3 Distribuição Weibull

A distribuição postulada por Waloddi Weibull (1951) é a que melhor representa o evento relacionado com a taxa de falha de sistemas técnico. Ela foi desenvolvida nos estudos sobre resistência mecânica dos aços e é uma distribuição muito flexível, e por esta razão, amplamente utilizada.

Ela pode ter diferentes formatos, e conseqüentemente se aproxima das outras distribuições. Pode ser tripamétrica ou bipamétrica “sendo apropriada à modelagem de tempos até a falha, apresentando funções de risco constante estritamente crescente e estritamente decrescente modelando adequadamente uma ampla variedade de situações” (LAFRAIA, 2001), em que unidades apresentam funções de risco distintas.

Com a distribuição tripamétrica pode-se determinar o período inicial de vida. Neste período inicial é também considerado o tempo gasto em testes ou ensaios de equipamentos eletrônicos (ensaios burn-in) ou rolamentos.

Em alguns casos é o período de tempo decorrido até a primeira falha de um item, num lote considerado.

A função densidade de probabilidade de falha para a distribuição Weibull tripamétrica é dada pela Equação 17.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\alpha} \right)^\beta} \quad (17)$$

Na distribuição biparamétrica, este período inicial é desconsiderado conforme dado na Equação 18, visto que o período de vida útil é muito maior que este período inicial.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta} \quad (18)$$

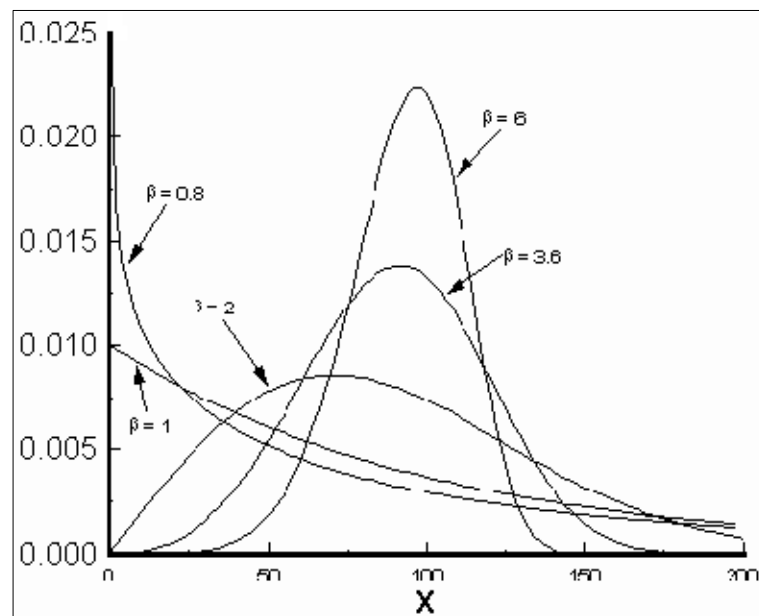
Onde:

$\beta$  = parâmetro de forma;

$\alpha$  = parâmetro de escala;

$\gamma$  = parâmetro de posição

Em qualquer dos casos, o parâmetro mais significativo da distribuição em termos de decisões para o projeto é o parâmetro de forma, normalmente representado por ( $\beta$ ). Seu efeito pode ser observado na Figura 38.



**Figura 38 - Influência do Beta na Função Densidade Weibull**  
 Fonte: Portal Action (2015).

Esse parâmetro permite representar o evento de falha nos três períodos mais significativos do ciclo de vida do produto conforme descrito na Figura 39.

$\beta$	Comportamento da função taxa de falhas
$< 1$	Taxa de falha crescente com o tempo, fase de mortalidade infantil
$= 1$	Taxa de falha constante e/ ou falhas aleatórias, função exponencial
$> 1$	Taxa de falha crescente com o tempo, fase de mortalidade infantil
$= 2$	Taxa de falha linearmente crescente
$> 2$	Taxa de falha cresce a uma taxa proporcional à potência (-1); distribuição de frequência, tornando-se mais simétrica à medida que $\beta$ cresce
$= 3,2$	Distribuição de frequência aproxima-se da distribuição Normal, tornando-se menos dispersa à medida que $\beta$ cresce

Figura 39 - Taxa de falhas em função de beta  
Fonte: Lafraia, (2001).

A Figura 40 apresenta como graficamente esse parâmetro também pode ser representado pela curva da banheira.

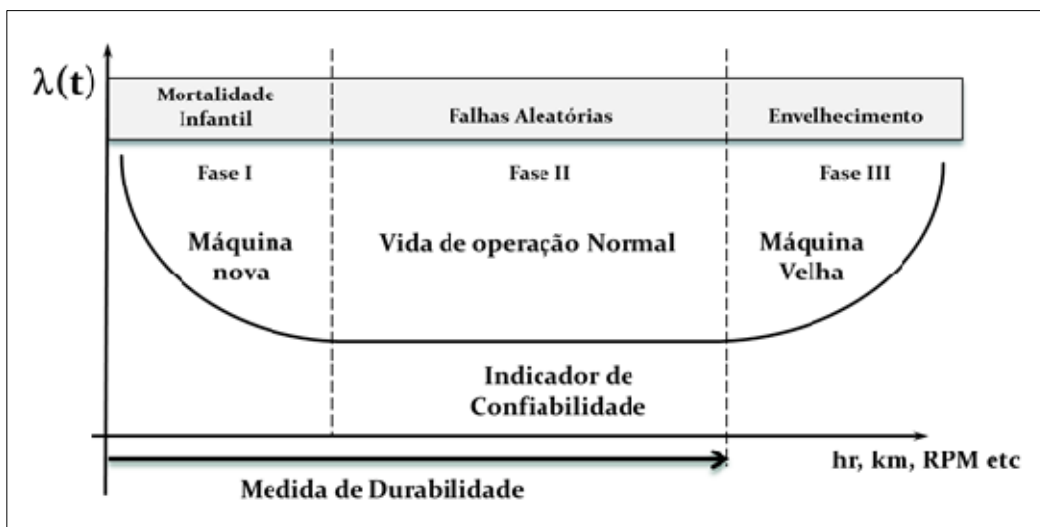


Figura 40 - Curva da banheira  
Fonte: Salgado (2008).

Onde pode se entender as fases da seguinte forma:

**A fase I**, a taxa de falhas decrescente, caracterizada por falhas de projeto e/ou de processo, chamado também de período de mortalidade Infantil. Nessa fase a estratégia de manutenção mais adequada é a corretiva.

**A fase II**, onde as taxas de falhas são aleatórias durante o período normal de uso se aproximando de uma distribuição exponencial e conhecido pela vida útil. Nessa fase a estratégia de manutenção mais adequada é a preditiva.

**A fase III**, tem taxa de falha crescente e descreve o período final de vida, chamado de período de envelhecimento. Nessa fase a estratégia de manutenção mais adequada é a preventiva.

O aumento da taxa de falhas se manifesta gradativamente, na forma de desgaste, fadiga, corrosão, vazamento, aumento de temperatura, ruído, vibração, perda de características elétricas, eletrônicas, químicas e físicas. Para acompanhar estas variáveis podem-se utilizar sensores para definir padrões de vida e orientar os procedimentos de manutenção, na forma de recuperação, troca ou descarte. Devido à predição das falhas em função dos parâmetros estabelecidos tem-se a chamada manutenção preditiva ou manutenção preventiva de condição.

A função de confiabilidade  $R(t)$ , que é a probabilidade do produto continuar funcionando além do tempo  $t$  é dada pela Equação 19.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (19)$$

A Equação 20 refere-se à Função de Probabilidade Acumulada de falha, após o tempo  $(t)$  de funcionamento.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (20)$$

E o MTBF calculado conforme Equação 21.

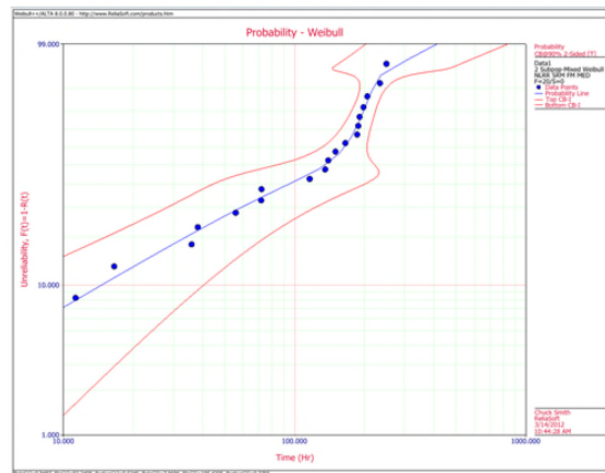
$$MTBF = t_0 + \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (21)$$

### 3.27.4 Distribuição Weibull Mista

A distribuição Weibull mista é usada para modelar dados que não se enquadram em uma linha reta em uma probabilidade Weibull. Os dados deste tipo, especialmente se os pontos de dados seguem uma forma de “S” sobre o gráfico de probabilidade, pode ser indicativo de mais do que um modo de falha na população de tempos de falha. Os dados de campo de uma dada população mista podem, frequentemente, representar vários modos de falha.

A necessidade de determinar as regiões da vida onde ocorrem estes modos de falha é evidente quando se percebe que os tempos até falha para cada modo pode seguir uma distribuição Weibull distintos, exigindo, portanto, tratamento matemático individual. Outra razão é que “cada modo de falha pode necessitar de uma alteração de estrutura diferente para melhorar a confiabilidade” (Billinton, 1983).

Na figura 41 apresenta diversas regiões plotadas através da Weibull mista.



**Figura 41 – Probabilidade Weibull mista**  
Fonte: Reliawiki (2015).

## 3.28 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS

“Em confiabilidade de sistemas é preciso construir um modelo (distribuição de vida) que represente o tempo até a falha de todo o sistema com base nas distribuições de vida dos componentes do qual ele é composto” (Mendonça, 2009).



Para se construir este modelo, é preciso considerar as relações entre os componentes e pode-se melhorar a confiabilidade global do sistema melhorando as decisões sobre a escolha dos componentes. Um dos principais motivos para se verificar os dados dos componentes para estimar a confiabilidade geral do sistema é que em muitas situações é mais fácil e barato testar os componentes, em vez de todo o sistema.

### 3.28.1 Sistema Reparável

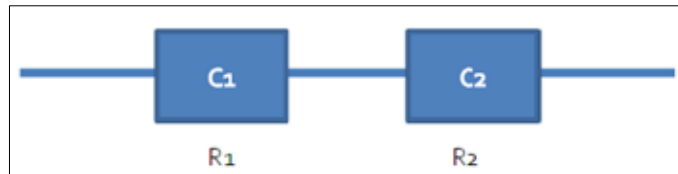
De acordo com Rigdon e Basu (2000) “um sistema reparável é aquele que, após a ocorrência de uma falha, pode ser retornado à condição de operação através de um reparo”. Um automóvel é um exemplo de sistema reparável já que a maior parte das falhas não exige que o automóvel seja substituído. Os reparos não precisam, necessariamente, envolver a substituição das partes do sistema. No caso de um automóvel, poderia se ter uma falha ao ligar o carro devido à má conexão com a bateria e o reparo poderia ser, por exemplo, a limpeza dos cabos.

### 3.28.2 Sistema Não-Reparável

Já nos sistemas não reparáveis esses são descartados após a primeira e única falha. Uma lâmpada é um exemplo de sistema não reparável, já que quando queima essa é descartada e substituída. Uma observação é que existem sistemas que após apresentarem uma falha poderiam ser reparados, mas quando o custo do reparo é maior que o da substituição esse reparo não ocorre e o sistema acaba sendo considerado como não reparável. Em Rigdon e Basu (2000) é citado o exemplo de uma calculadora. “Apesar de poder ser reparada, o custo disso deve ser próximo ao custo de comprar uma nova e por isso poderia ser considerada como um sistema não reparável”.

### 3.28.3 Sistema em Série

Se a operação requer que todos os componentes funcionem satisfatoriamente ao mesmo tempo, tem se um sistema em série, conforme representado na Figura 42.

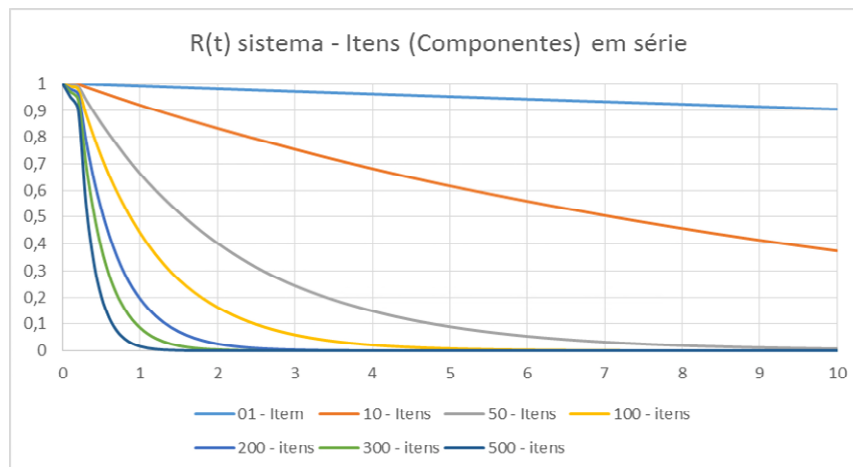


**Figura 42 – RBD em Série**  
**Fonte: Autor, 2015.**

Onde a confiabilidade do sistema é dada pela Equação 22.

$$R(t)_{sistema} = \prod_{i=1}^N R(t)_i \quad (22)$$

Conforme pode ser observado na Figura 43, quanto maior a quantidade de componentes colocados em série em único sistema, menor será sua confiabilidade.

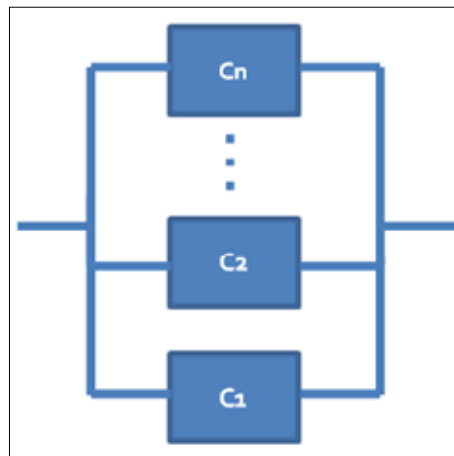


**Figura 43 – R(t) do sistema em série.**  
**Fonte: Autor (2015).**

Resumidamente o sistema depende das confiabilidades individuais de seus componentes.

#### 3.28.4 Sistema em Paralelo

Para manter a confiabilidade tão alta quanto possível, e para minimizar o efeito da Lei do Produto, são empregados recursos como uso de componentes com confiabilidade extremamente altas e sistemas de redundância paralela entre outros.

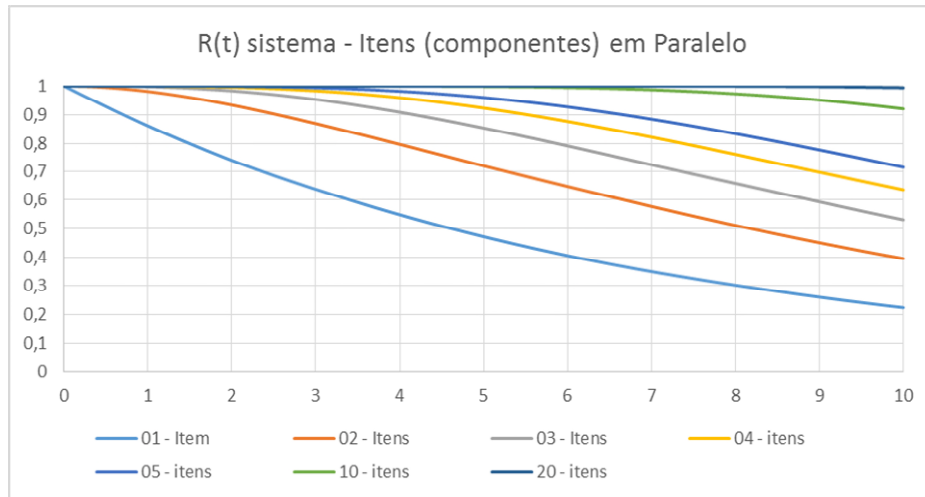


**Figura 44 - RBD Sistema em Paralelo**  
Fonte: Autor (2015).

Nesse caso a confiabilidade do sistema é pela Equação 23.

$$R(t)_{sistema} = 1 - \left[ \prod_{i=1}^N (1 - R(t).i) \right] \quad (23)$$

A montagem em paralelo aumenta a confiabilidade do sistema em relação a confiabilidade de qualquer um dos componentes originais, conforme ilustrado na Figura 45.



**Figura 45 – R(t) Sistema em paralelo**  
**Fonte: Autor (2015).**

Ao contrário do sistema em série, nesse caso quanto maior a quantidade de componentes colocados em paralelo em único sistema, maior será sua confiabilidade.

## 4 COMPARAÇÃO DE MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE

As duas empresas que possuem a base de equipamentos instalados, dos quais será objeto de análise, terão aqui seus nomes preservados. Ficando denominado apenas como:

### **Celulose A**

### **Celulose B**

Todos os equipamentos aqui analisados possuem características construtivas idênticas do tipo ANSI, tendo toda sua parte úmida fabricada em material inox duplex (A890 3A), com variação apenas de seu tamanho e capacidade. Podendo nesses casos possuir vazão de 3 l/s até 3000 l/s, altura manométrica de até 160 metros e limite da temperatura do fluido de até 180 °C.

### 4.1 CELULOSE A

Inaugurada no primeiro semestre de 2009, capacidade de produção de 1,3 milhão de toneladas/ano a referida empresa se tornou a maior produtora de celulose de fibra curta do mundo. Além de ser um modelo de qualidade ambiental com as mais modernas técnicas de proteção ambiental do mundo. A celulose produzida é 100% feita a partir de florestas plantadas de eucalipto, gerando um diferencial competitivo internacional. Nessa planta estão instaladas 277 bombas de processo, e todos os dados sobre as falhas foram extraídas do sistema SAP. Atualmente essa empresa passa por um processo de ampliação de sua capacidade produtiva, com mais uma linha com capacidade de 1,95 milhões de toneladas/ano. A previsão é que essa nova linha de produção seja inaugurada até novembro de 2017 onde se estima que seja instalado aproximadamente mais 380 bombas de processo.

No quadro 6, segue o resumo do tempo até a falha e suspensões de todos os equipamentos instalados a planta ocorridas desde 2009.

<b>Dias</b>	<b>Falhas</b>
0-200	13
201-400	19
401-600	16
601-800	9
801-1000	7
1001-1200	8
1201-1400	13
1401-1600	12
1601-1800	28
1801-2000	48
2001-2200	8
2201-2400	17
2401-2600	12
<b>Total de Falhas</b>	<b>210</b>
<b>Suspensão (direita)</b>	<b>123</b>

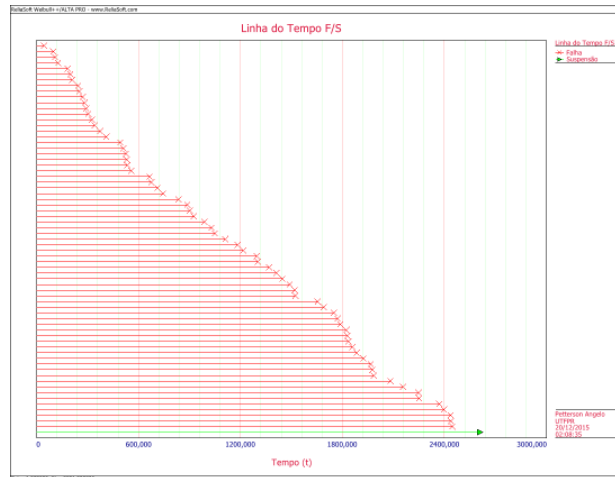
**Quadro 6 - Dados de Falhas e Suspensões.  
Fonte: Autor (2015).**

Alguns equipamentos falharam mais de uma vez e por isso tem se uma soma superior aos 277 equipamentos instalados na fábrica.

Para análise dos dados está sendo utilizado o software Weibull++.

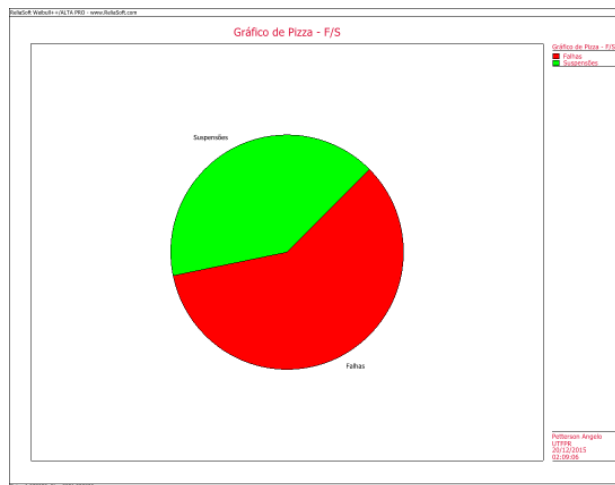
Esse software oferece um conjunto completo de ferramentas para a análise de dados de vida, permitindo diversos tipos de cálculos, gráficos e relatórios. Suporta diversas distribuições incluindo Weibull, Weibull Mista, Exponencial, Lognormal, Normal, Gamma Generalizada, Gamma, Loglogistic, Gumbel e Weibull-Bayesiana (Reliasoft, 2015).

Depois de inserido os dados no software, no Gráfico 15 é possível observar a linha do tempo das falhas ocorridas no período e suspensões.



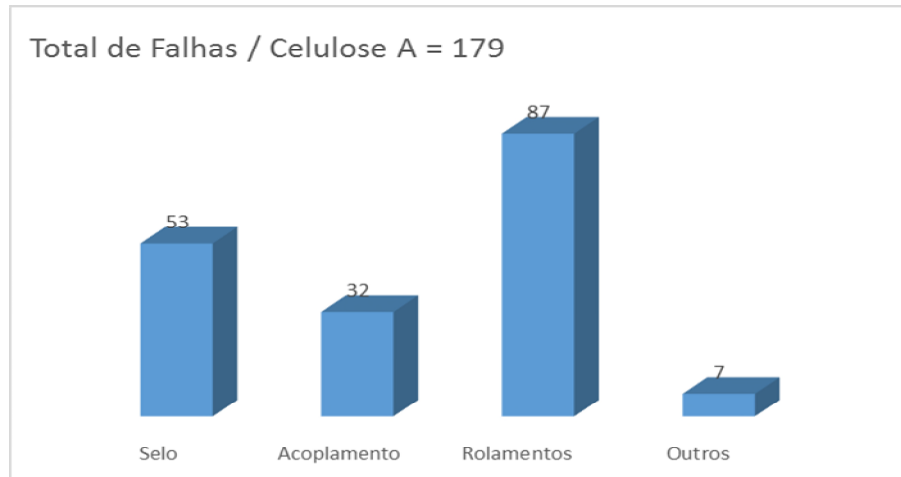
**Gráfico 15- Linha do tempo de Falhas e Suspensões / Celulose A**  
**Fonte: Autor (2015).**

No Gráfico 16 pode-se verificar visualmente que os números de falhas superam os equipamentos que apresentam suspensões.



**Gráfico 16 - Distribuição de Falhas e Suspensões / Celulose A**  
**Fonte: Autor (2015).**

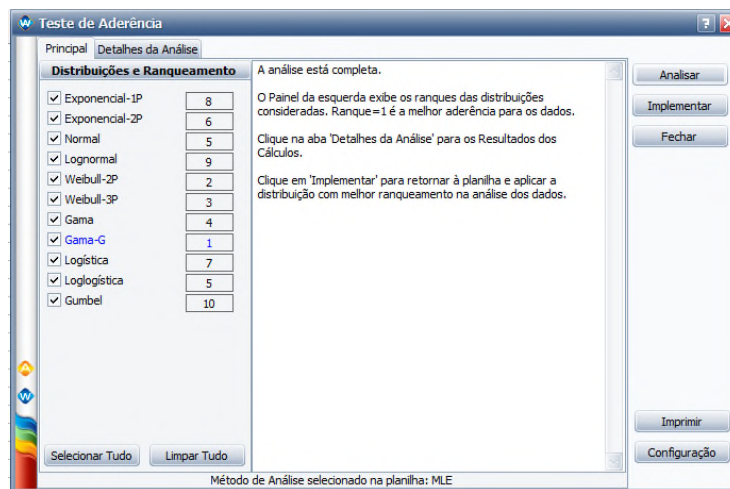
No Gráfico 17, segue os principais modos de falhas e componentes que causaram a perda da função do equipamento.



**Gráfico 17 – Falhas por componentes / Celulose A**  
 Fonte: Autor (2015).

O software possibilita realizar testes de aderência.

Onde automaticamente é definida a distribuição mais adequada para o conjunto de dados conforme apresentado na Figura 46.



**Figura 46 - Teste de aderência / Celulose A**  
 Fonte: Autor (2015).

Conforme pode se observar a distribuição que apresentou maior aderência foi a Gama-G. Sendo essa por sua vez uma distribuição não frequentemente



utilizada devido a sua complexidade matemática, sua exigência por grandes tamanhos de amostras e a sua capacidade de imitar outras distribuições.

Neste caso, utilizado a distribuição Weibull, por ser a mais comumente aplicada em componentes técnicos, podendo representar todas as fases de vida dos equipamentos.

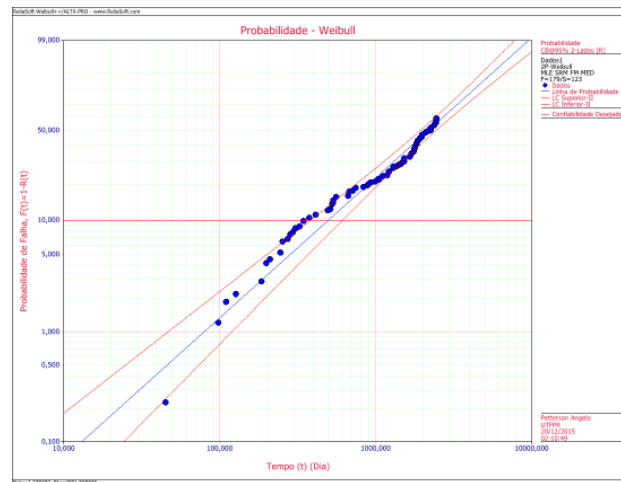
O método utilizado para essa análise será o MLE por suportar melhor dados com suspensões do que a regressão

No Quadro 7, segue o relatório dos resultados simplificados gerados através do software.

<b>Relatório de Resultados Simplificado</b>		
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++	
<b>Informações do Usuário</b>		
Usuário	Petterson Angelo	
Empresa	UTFPR	
Data	20/12/2015	
<b>Parâmetros</b>		
Distribuição:	Weibull-2P	
Análises:	MLE	
Método do IC:	FM	
Ranqueando:	MED	
Beta	1,278202	
Eta (Dia)	2891,598836	
Valor da LK	-1613,938002	
F \ S	179 \ 123	
<b>LOCAL VAR/COV MATRIX</b>		
	Var-Beta=0,007686	CV Eta Beta=-4,665460
	CV Eta Beta=-4,665460	Var-Eta=31422,535221
<b>Fim do Relatório de Resultados Simplificado</b>		

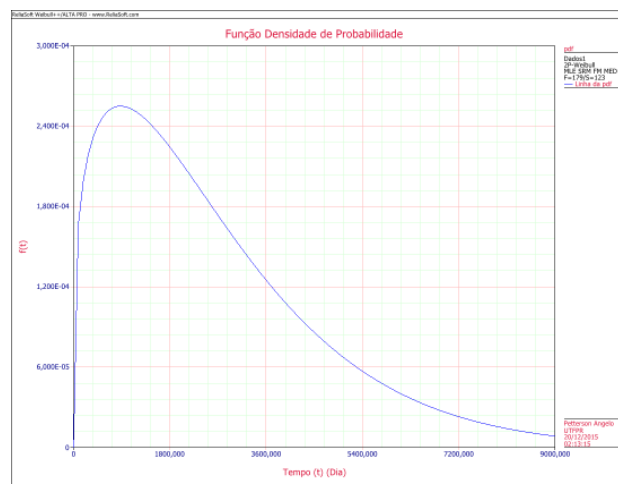
**Quadro 7- Parâmetros software Weibul ++ / Celulose A.**  
**Fonte: Autor (2015).**

Na Figura 47, segue plotado todas as falhas dentro do limite de confiança Bilateral.



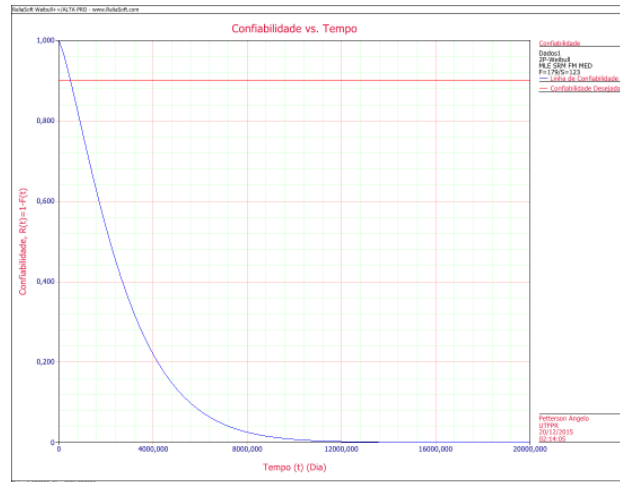
**Figura 47 - Probabilidade Weibull / Celulose A**  
**Fonte: Autor (2015).**

Na Figura 48, segue a Função de Densidade de Probabilidade (PDF) que representa o comportamento geral dos equipamentos avaliados. Ou seja, a distribuição das falhas no tempo.



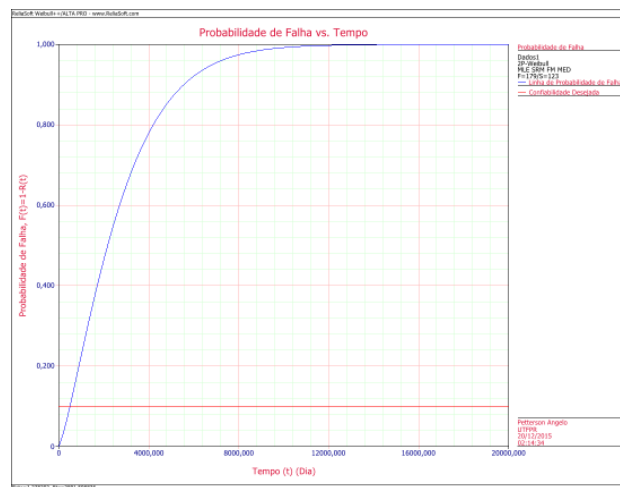
**Figura 48 - PDF / Celulose A**  
**Fonte: Autor (2015).**

A Figura 49 fornece uma representação visual da função de confiabilidade  $R(t)$  que diminui em função do tempo.



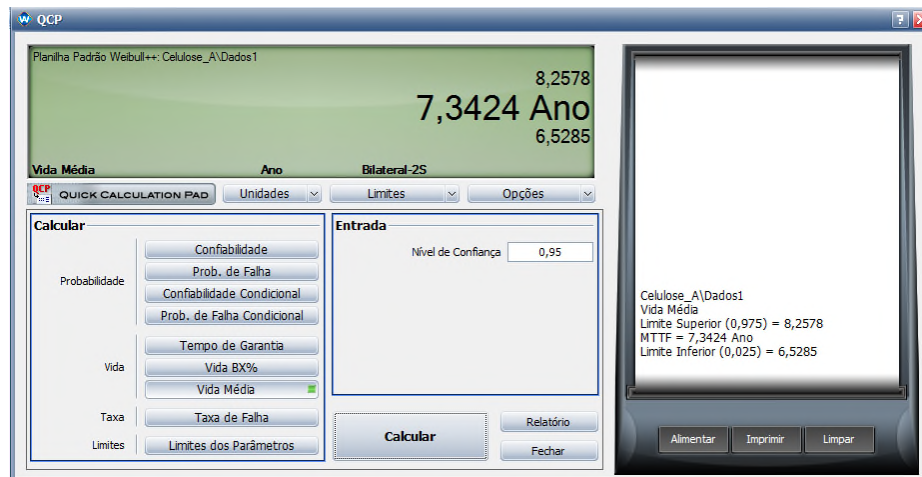
**Figura 49 - Confiabilidade  $R(t)$  / Celulose A**  
**Fonte: Autor (2015).**

Já na Figura 50 fornece a representação visual da função de probabilidade de falha  $F(t)$ , que diferentemente da anterior aumenta em função do tempo.



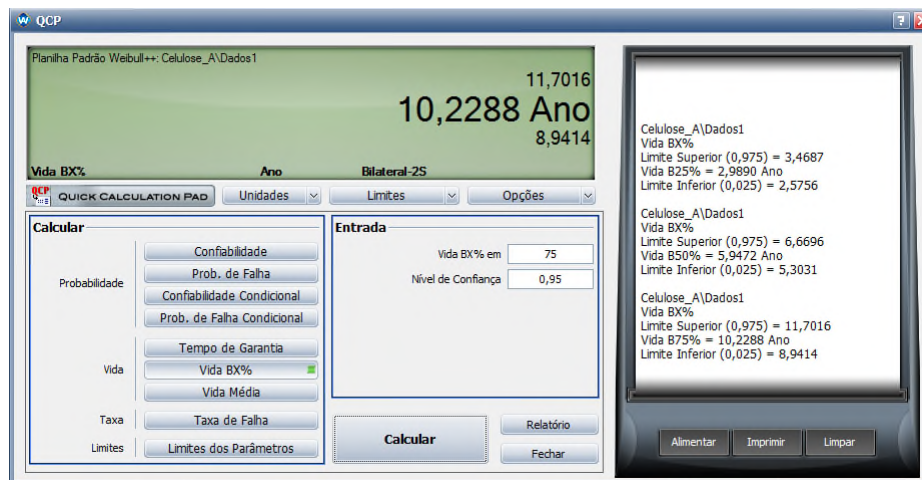
**Figura 50 - Probabilidade de Falha / Celulose A**  
**Fonte: Autor (2015).**

Conforme pode ser observado na Figura 51, o MTTF estimado para a planta de celulose A é de 7,34 anos, muito acima daquele apresentado na tabela 8, comparando bombas ANSI e API.



**Figura 51 - Tempo Médio para Falhar (MTTF) / Celulose A**  
Fonte: Autor (2015).

Na Figura 52 está representado o tempo BX, onde a desconfiabilidade é igual a x% nesse caso está sendo considerado o tempo no qual 25, 50 ou 75% dos equipamentos irão falhar.



**Figura 52 - Análises BX25%, BX50% e BX75% / Celulose A**  
Fonte: Autor (2015).

Sendo 208 bombas iguais a 75% do total dos equipamentos instalados, pode se esperar que leve cerca de 10 anos para que todas essas 208 bombas falhem.

## 4.2 CELULOSE B

Essa empresa teve o início de sua construção em junho de 2010 e sua conclusão no segundo semestre de 2012, o investimento estimado foi de 4 bilhões de reais incluindo todas as suas operações industriais e florestal.

Oficialmente sua inauguração ocorreu em 12 de dezembro de 2012, e seu projeto concebido para uma produção de 1,5 milhões de tonelada/ano de celulose, sendo que 90% destinado à exportação e empregando atualmente cerca de 8000 trabalhadores de forma direta ou indireta.

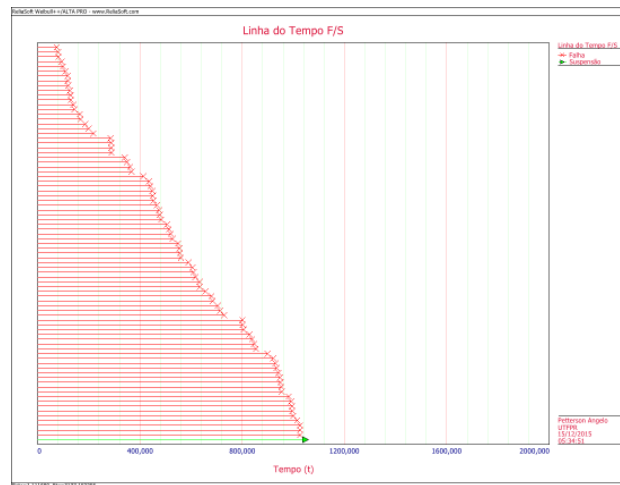
Nessa planta estão instaladas 333 bombas de processo, e todos os dados sobre as falhas foram extraídas do sistema SAP e precisaram ser tratados.

No quadro 08, segue o resumo do tempo até a falha de todos os equipamentos e suspensões ocorridas desde 2012. Alguns equipamentos falharam mais de uma vez e por isso tem se uma soma superior aos 333 equipamentos instalados na fábrica.

<b>Dias</b>	<b>Falhas</b>
0-99	6
100-199	16
200-299	6
300-299	4
400-499	10
500-599	10
600-699	8
700-799	4
800-899	7
900-999	13
1000-1099	5
<b>Total de Falhas</b>	<b>89</b>
<b>Suspensão (direita)</b>	<b>262</b>

**Quadro 8 - Dados de Falhas e Suspensões.**  
**Fonte: Autor (2015).**

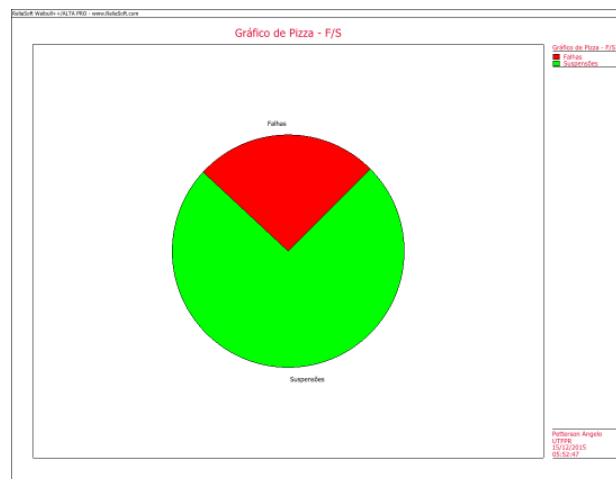
Depois de inserido os dados no software no Gráfico 15 é possível observar a linha do tempo das falhas ocorridas e suspensões.



**Gráfico 18 - Linha do tempo de Falhas e Suspensões / Celulose B**  
**Fonte: Autor (2015).**

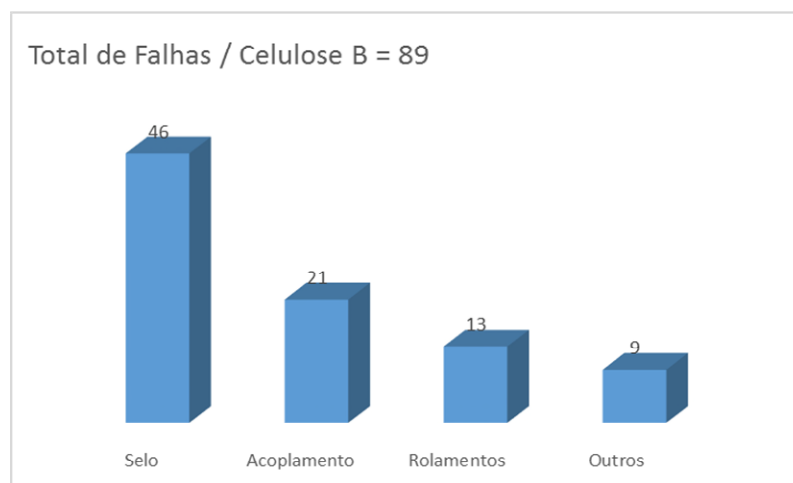
No Gráfico 19 pode-se verificar visualmente que os números de suspensões superam os equipamentos que apresentam falhas.

Provavelmente por se tratar de uma planta mais nova é realmente esperado que tenha menos falhas.



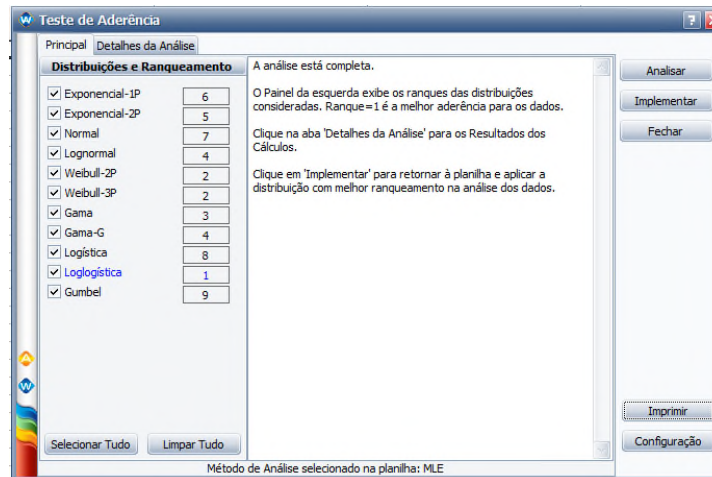
**Gráfico 19 - Distribuição de Falhas e Suspensões / Celulose B**  
**Fonte: Autor (2015).**

No Gráfico 20, segue os principais modos de falhas e componentes que causaram a perda da função do equipamento.



**Gráfico 20 – Falhas por componentes / Celulose B**  
**Fonte: Autor (2015).**

O software automaticamente defini a distribuição mais adequada para o conjunto de dados conforme apresentado na Figura 53.



**Figura 53 - Teste de aderência / Celulose B**  
**Fonte: Autor (2015).**

A log-logística é uma distribuição de probabilidade contínua para uma variável aleatória não-negativa. Ela é usada em análises de sobrevivência como um modelo paramétrico onde os eventos cuja taxa de falha aumenta inicialmente e diminui mais tarde. Ou seja, fornece um modelo paramétrico para análise de sobrevida.

Neste caso, a distribuição Weibull será a que melhor representara os dados de falhas. O método utilizado nessa análise será o MLE por suportar melhor dados com suspensões do que a regressão.

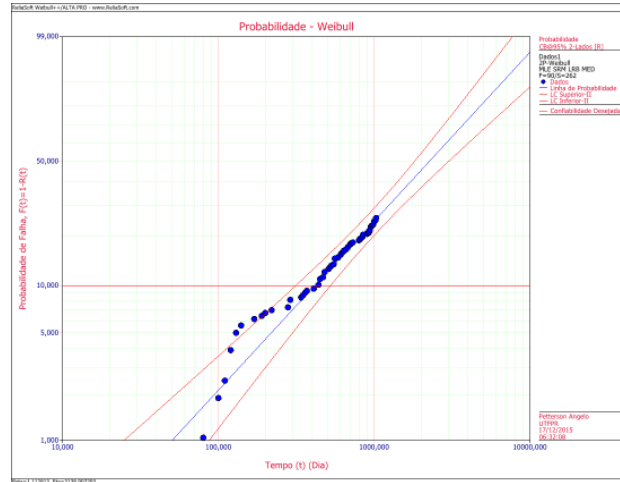
No Quadro 9, segue o relatório dos resultados simplificados gerados através do software.

<b>Relatório de Resultados Simplificado</b>		
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++	
<b>Informações do Usuário</b>		
Usuário	Petterson Angelo	
Empresa	UTFPR	
Data	17/12/2015	
<b>Parâmetros</b>		
Distribuição:	Weibull-2P	
Análises:	MLE	
Método do IC:	FM	
Ranqueando:	MED	
Beta	1,11168	
Eta (Dia)	3137,152256	
Valor da LK	-825,780417	
F \ S	90 \ 262	
<b>LOCAL VAR/ COV MATRIX</b>		
	Var-Beta=0,012754	CV Eta Beta=-41,791058
	CV Eta Beta=-41,791058	Var-Eta=225422,938027
<b>Fim do Relatório de Resultados Simplificado</b>		

**Quadro 9 - Parâmetros software Weibull ++ / Celulose B**  
**Fonte: Autor (2015)**

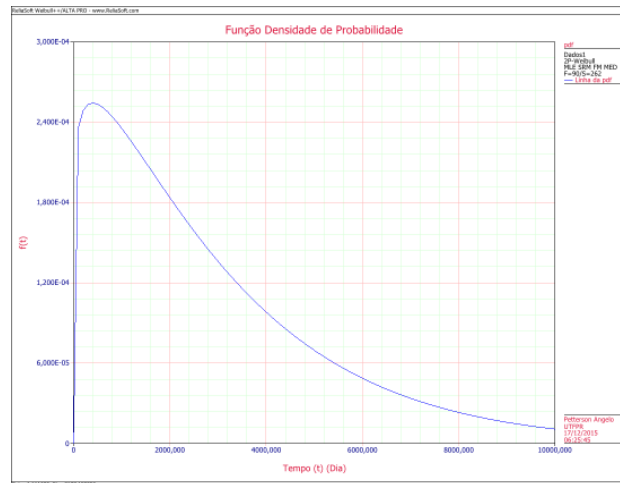


Na Figura 54, segue plotado todas as falhas dentro do limite de confiança Bilateral.



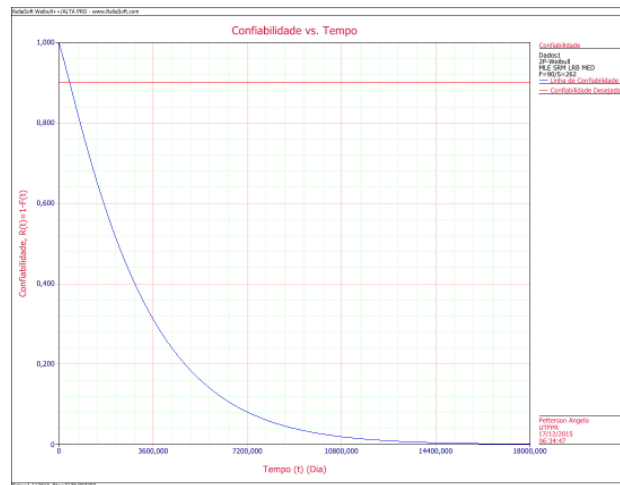
**Figura 54 - Probabilidade Weibull / Celulose B**  
**Fonte: Autor (2015).**

Na Figura 55, segue a Função de Densidade de Probabilidade (PDF) que representa o comportamento geral dos equipamentos avaliados. Ou seja, a distribuição das falhas no tempo.



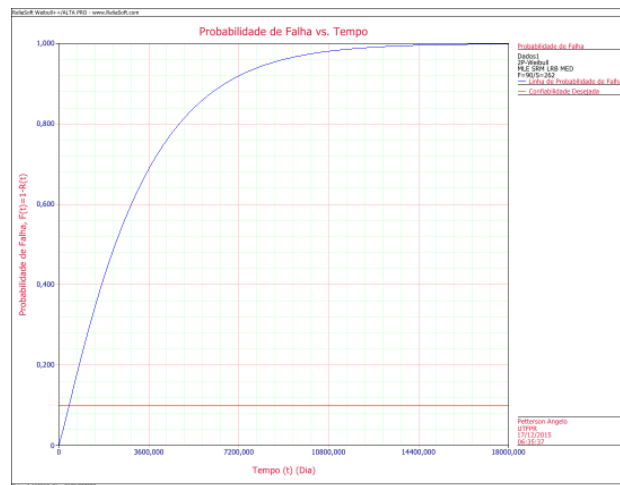
**Figura 55 – Função de densidade de Probabilidade (PDF) / Celulose B**  
**Fonte: Autor (2015).**

Na Figura 56 fornece uma representação visual da a função de confiabilidade  $R(t)$  que diminui em função do tempo.



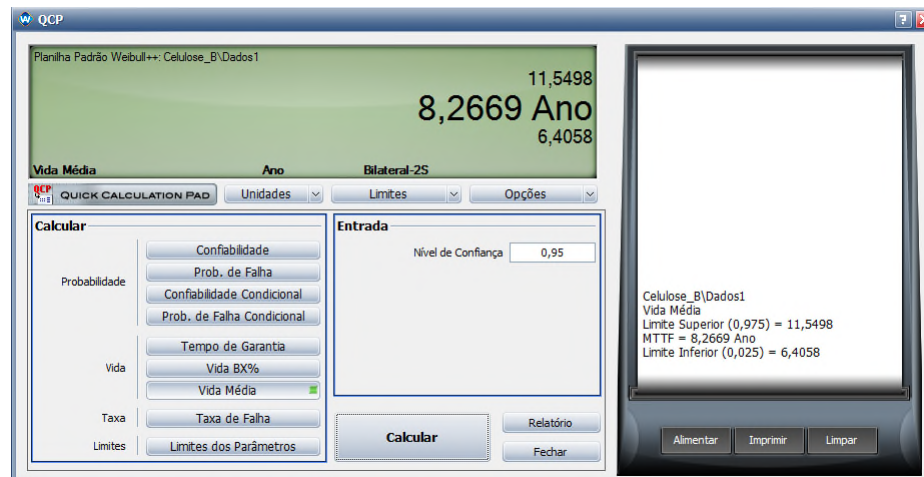
**Figura 56 - Confiabilidade  $R(t)$  / Celulose B**  
**Fonte: Autor (2015).**

A Figura 57 fornece a representação visual da função de probabilidade de falha  $F(t)$ , que diferentemente da anterior aumenta em função do tempo.



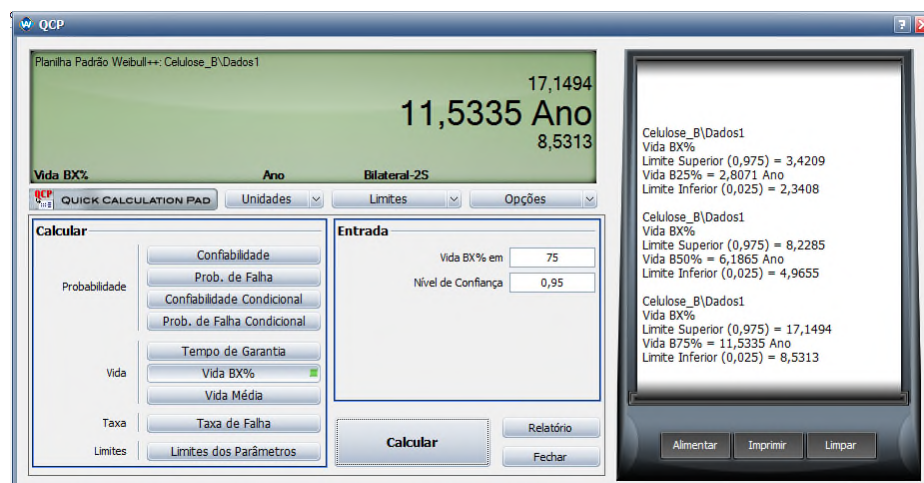
**Figura 57 - Probabilidade de Falha / Celulose B**  
**Fonte: Autor 2015**

Conforme pode ser observado na Figura 58 o MTTF estimado para a planta de celulose B é de 8,26 anos.



**Figura 58 - Tempo Médio para Falhar (MTTF) / Celulose B**  
**Fonte: Autor 2015.**

Na Figura 59 está representado o tempo BX, onde a desconfiabilidade é igual a x% nesse caso está sendo considerado o tempo no qual 25, 50 ou 75% dos equipamentos irão falhar.



**Figura 59 - Análises BX25%, BX50% e BX75% / Celulose B**  
**Fonte: Autor (2015).**

Considerando que aproximadamente 250 bombas é igual a 75% do total dos equipamentos instalados, pode se esperar que levará cerca de 11 anos para que todos essas 25 bombas falhem.

## 5 CONCLUSÃO

Ficou claro que as duas plantas, possuem elevados padrões de instalação e uso, o que contribui com elevada expectativa de vida dos equipamentos. Muito acima dos valores MTBF esperados para bombas ANSI apresentado no Quadro 3.

Isso também se deve ao fato de que as práticas de manutenção preditiva e monitoramento de condição tem evoluído bastante ocasionando uma tendência para a redução da gravidade das falhas.

Também é de conhecimento que as duas empresas possuem estrutura própria para reparo dos equipamentos, mão de obra qualificada e elevada quantidade de sobressalentes o que contribui para valores tão significativos.

A principal dificuldade encontrada nesse trabalho foi o levantamento e tratamento de dados, pois apesar de ambas possuírem um sistema avançado SAP, a descrição das falhas não possuía padrões e na maioria das vezes o texto inserido pelo usuário ou mantenedor pode ser considerado muito pobre de informação.

O conhecimento das características de vida dessas duas populações de equipamentos, possibilitará futuramente algumas considerações quanto à viabilidade de implementação de uma unidade de serviços para atendimento local dessas fabricas.

## 6 REFERÊNCIAS

Alessandro Birolini, **Reliability Engineering: Theory and Practice** 7th Edition. Springer-Verlag, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 5462**. Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

Billinton R., Allan, R.N., **Reliability evaluation of engineering systems**. London: Plenum Press. 1983.

Edson Ezequiel de Mattos, Reinaldo de Falco, **Bombas Industriais** - 2a. ed.  
- Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

Elsayed A. **Reliability Engineering**, Addison Wesley Longman, Inc. 1996.

Emerson Rigoni, **Métodos para Análise de Falhas**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

Emílio Menin, **Manual Bombas Centrífugas**. Sulzer Pumps, 2009

H. Paul Barringer. P.E; **Availability, Reliability, Maintainability and Capability** -Barringer & Associates Inc., Humble Texas <[www.barringer1.com](http://www.barringer1.com)>

Harilaus G. Xenos, **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. Indg, 2004.

Heinz P. Bloch, Allan R. Budris, **Pump User's Handbook: Life Extension**, Fourth Edition. The Fairmont Press, Inc., 2010.

Yesyen **Tipos de Bombas Centrífugas**, Disponível em:  
<[http://www.yesyen.com/centrifugal\\_pump\\_types.php](http://www.yesyen.com/centrifugal_pump_types.php) >, Acesso em: Out. 2015.

Lafraia, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

Moubray, J. **Reliability-centered maintenance**. New York: Industrial Press, 1992

Paulo Zalenski de Matos, Dianne Mara Zotti, **Análise de Confiabilidade aplicada a indústria para estimação de falhas e provisionamento de Custos**. Monografia apresentada à disciplina de Laboratório de Estatística do Curso de Estatística do Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná. 2010.

PYZEDEK, THOMAS. **The Six Sigma Handbook** – A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels. New York: McGraw-Hill, 2003

Portal Action, **Análises estatísticas, Confiabilidade**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/>>; Acesso em: Dez. 2015.

Reliasoft, **Análise dos dados de vida**. Disponível em: <<http://www.reliawiki.org/>>; Acesso em: Dez. 2015

Ribeiro, J.L.D. **Confiabilidade de Componentes e Sistemas**. UFRGS/PPGEP, Porto Alegre, 2003. Paginação irregular.

Rigdon, S. E. e Basu, A. P. **Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems**. John Wiley & Sons, New York, 2000

Rui Assis, **Manutenção Centrada na Fiabilidade**, Lidel. 1997.

Salgado, M. F. P. **Aplicação de técnicas de otimização à engenharia de confiabilidade**. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Elétrica) - UFMG, Belo Horizonte, 2008.

Sulzer Pumps; **Bombas Centrífugas**. Disponível em <[www.sulzer.com](http://www.sulzer.com)> Acesso em: dez. 2015.