

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA**

**MBA EM GESTÃO DE ATIVOS**

**PETTERSON CARLOS ÂNGELO**

**ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA PARA BOMBAS  
CENTRÍFUGAS, UTILIZANDO A SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO,  
PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE E ESTRATÉGIAS ESPECÍFICAS  
DE MANUTENÇÃO.**

**MONOGRAFIA - ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2020**

**PETTERSON CARLOS ANGELO**

**ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA PARA BOMBAS  
CENTRÍFUGAS, UTILIZANDO A SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO,  
PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE E ESTRATÉGIAS ESPECÍFICAS  
DE MANUTENÇÃO.**

Monografia apresentada ao Programa de MBA  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Especialista em Gestão de Ativos, do DAELT -  
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni.

**CURITIBA**

**2020**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica  
MBA em Gestão de Ativos



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS,  
UTILIZANDO A SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO, PARÂMETROS DE  
CONFIABILIDADE E ESTRATÉGIAS ESPECÍFICAS DE MANUTENÇÃO.**

**PETTERSON CARLOS ÂNGELO**

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 24 de fevereiro de 2020, 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.  
Professor Orientador - UTFPR

---

Prof. Wanderson Stael Paris, Me.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

---

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.  
Membro Titular da Banca – UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

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 e meus sobrinhos Isabela e Miguel, 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.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.  
(Arthur Schopenhauer, 1788 - 1860)

## RESUMO

ÂNGELO, P. C. **Análise dos Custos do Ciclo de Vida Utilizando a Simulação de Monte Carlo, Parâmetros de Confiabilidade e Estratégias Específicas de Manutenção.** 2020. 84p. Trabalho de Conclusão de Curso de MBA de Gestão de Ativos – UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

Existe um crescimento global e consciente de que os recursos mundiais são finitos e que devem ser usados cuidadosamente com o mínimo de desperdícios para não prejudicar as futuras gerações. O uso de energia elétrica de forma racional pode contribuir diretamente ou indiretamente para variar a formas de poluição ambiental e no mesmo tempo beneficia o usuário reduzindo o custo. Estima-se que atualmente cerca de 10 bilhões de bombas centrífugas estejam em uso no mundo e que os sistemas de bombeamento, consomem cerca de 1/5 de toda a eletricidade produzida no globo. Independente da aplicação, seja ele doméstico, comércio, agricultura, infraestrutura ou industrial para o processamento de alimentos, químicos, petroquímicos, farmacêuticos e indústrias mecânicas. O mundo moderno não existe sem os sistemas de bombeamento. O objetivo desse trabalho é apresentar os principais conceitos do Custo do Ciclo de Vida (LCC – Life Cycle Cost) aplicados em bombas centrífugas, utilizando a simulação de Monte Carlo relacionando com os parâmetros de confiabilidade e as práticas de substituição de peças como normalmente adotadas em atividades de manutenção. Será possível comparar a métricas de confiabilidade de equipamentos que possuem dados de vida diferentes sobre a influência das condições de uso e instalação.

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Bombas centrífugas. Custo do ciclo de Vida. Simulação. Monte Carlo.

## ABSTRACT

ÂNGELO, P. C. **Life Cycle Cost Analysis from Monte Carlo Simulation, Reliability Parameters and Specific Maintenance Strategies**. 2020. 84p. Work Specialization Course Completion MBA, Asset Management - UTFPR - Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2020.

Already for some years now, there has been a global and conscious growth, that the world's resources are finite and that they should be used with minimal waste, as they do not harm as the future. Rational use of electricity can contribute directly or indirectly to changing forms of environmental pollution and at the same time as the user uses or uses the benefit. Currently, it is estimated that around 10 billion centrifugal pumps are in use worldwide and pumping systems consume about 1/5 of all stored electricity on the globe. Regardless of the application, be it domestic, trade, agriculture, infrastructure or industrial for food processing, chemicals, petrochemicals, pharmaceuticals and mechanical industrials. The modern world does not exist without pumping systems. The objective of this paper is to present the main concepts of Life Cycle Cost (LCC - LIFE CYCLE COST), applied to centrifugal pumps, using a Monte Carlo simulation, relating to the use patterns and parts replacement practices, as normally used in maintenance activities. It will be possible to compare equipment metrics that have different life data on the influence of usage and installation conditions.

**Keywords:** Reliability. Centrifugal Pumps. Life Cycle Cost. Simulation. Monte Carlo.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1.1 Classificação geral das bombas	16
Figura 1.1.2 Princípio de Funcionamento	17
Figura 1.1.3 Tipos de bombas centrífugas	17
Figura 1.1.4 Configuração básica das bombas centrífugas.	18
Figura 2.1.1 Comparação energia elétrica por países (USD / kWh)	19
Figura 2.1.2 Custo Médio da Energia Elétrica industrial no Brasil (R\$/MWh).	20
Figura 2.1.3 Exemplo da Matriz de Decisão LCC	21
Figura 2.2.1 Custo típicos no ciclo de vida das bombas centrífugas	21
Figura 2.2.2 Exemplo de perfil de consumo anual de um equipamento	25
Figura 3.1.1.1 Representação de um componente	32
Figura 3.1.2.1 Representação de um equipamento com componentes em série	33
Figura 3.1.4.1 Ilustração dos intervalos de manutenção	34
Figura 3.2.1.1 Representação das funções $F(t)$ e $R(t)$	37
Figura 3.2.1.2 Função densidade de probabilidade	38
Figura 3.2.1.3 Representação de $F(t)$ , $R(t)$ e $f(t)$	39
Figura 3.2.3.1 Influência do Beta na Função Densidade Weibull	41
Figura 3.2.3.2 Curva da banheira	42
Figura 3.3.1 RBD de uma bomba centrifuga	44
Figura 3.3.2 Fatores determinantes para confiabilidade das bombas	45
Figura 3.3.3 Bomba de Dupla Sucção	45
Figura 3.3.4 Bomba múltiplos estágio	46
Figura 3.3.5 Construção típica API	47
Figura 3.3.6 Construção típica ANSI.	48
Figura 3.3.7 Base de Fundação	49
Figura 3.3.8 Efeito da base de fundação na vida dos componentes.	50
Figura 3.3.9 Condição típica de desalinhamento	51
Figura 3.3.10 - Análise Termográfica	52
Figura 3.3.11 - Efeitos do desalinhamento na Vida dos Componentes	52
Figura 3.3.12 Regime de fluxo	53
Figura 3.3.13 Influência hidráulica na sucção da bomba	53
Figura 3.3.14 Diâmetro da tubulação de sucção	54
Figura 3.3.13 Bombas em uma única tubulação	55
Figura 3.3.14 Comprimento reto da tubulação de sucção	55
Figura 3.3.17 - Efeitos da tubulação na vida dos componentes	56
Figura 3.3.18 Tubulação suportada	57
Figura 3.3.16 - Desalinhamento radial e angular	57
Figura 3.3.20 Efeitos dos esforços da tubulação na vida dos componentes	58
Figura 3.3.21 - Sintomas e efeito na confiabilidade causado pelo BEP	59

Figura 3.3.22 - Efeitos do BEP na Vida dos Componentes	60
Figura 3.3.23 - Custo anual de Operação em função do BEP	60
Figura 4.1.1 Parâmetros de confiabilidade para simulação	62
Figura 4.1.2 Parâmetros de confiabilidade para simulação	63
Figura 4.1.3 Melhores Práticas de Instalação e Uso	65
Figura 4.1.4 Boas Práticas de Instalação e Uso	65
Figura 4.1.5 Práticas comum de Instalação e Uso	66
Figura 4.1.6 Principais custos relacionados	66
Figura 4.1.2.5 Condições operacionais e custos elétricos relacionados	67
Figura 4.1.8 Consequência das falhas	68
Figura 4.1.4.1 Substituição de componentes associados	69
Figura 4.1.10 Substituição apenas do componente danificado	70
Figura 4.3.3 Duração das atividades de manutenção em horas	70
Figura 4.1.4.3 Custo estimado para intervenções de manutenção	71
Figura 5.1.1 Resultados da Análise 1#	73
Figura 5.2.1 – Resultados da Análise 2#	74
Figura 5.3.1 – Resultados da Análise 3#	75
Figura 5.4.1 – Resultados da Análise 4#	76

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LCC	Life Cycle Cost
MTTF	Mean Time to Failures
MTBF	Mean Time between Failures
OPEX	Operational Expenditure
CAPEX	Capital Expenditure
ANSI	American Nacional Standard Institute
API	American Petroleum Institute

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\beta$  – Beta, parâmetro de forma na engenharia de confiabilidade  
 $\eta$  – Eta, parâmetro de posição na engenharia de confiabilidade

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DA PESQUISA .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	13
1.2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVAS.....	14
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	14
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2 LCC DE BOMBAS CENTRÍFUGAS E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO .....</b>	<b>16</b>
2.1 BOMBAS CENTRÍFUGAS .....	16
2.2 LCC - CUSTO DO CICLO DE VIDA.....	19
2.3 LCC APLICADO PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS .....	21
2.3.1 Custos Iniciais (C ini).....	23
2.3.2 Custos Instalação (C ins), comissionamento e start-up .....	24
2.3.3 Custos de energia (C ene) .....	25
2.3.4 Custos de Operação (C ope) .....	27
2.3.5 Custos de Manutenção (C man) .....	27
2.3.6 Custos de Inatividade (C ina).....	28
2.3.7 Custos Ambientais (C amb) .....	29
2.3.8 Custos Descomissionamento (C des) .....	29
2.3.9 Custos Totais do Ciclo de Vida - LCC .....	29
2.4 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.....	30
2.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPITULO.....	31
<b>3 ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE .....</b>	<b>32</b>
3.1 DEFINIÇÕES .....	32
3.1.1 Componente.....	32
3.1.2 Equipamento .....	32
3.1.3 Sistema .....	33
3.1.4 Falha .....	33
3.1.4.1 Tempo Médio para Falha (TMPF) .....	34
3.1.4.2 Tempo Médio para Reparar (TMPR).....	34
3.1.4.3 Tempo Médio entre Falhas (TMEF) .....	34
3.1.5 Manutenibilidade.....	35
3.1.6 Disponibilidade.....	35
3.1.7 Vida útil .....	35
3.2 CONFIABILIDADE .....	35
3.2.1 Métricas da confiabilidade.....	36
3.2.1.1 Função de densidade de probabilidade de falha.....	37

3.2.2	Análise dos dados de vida .....	39
3.2.2.1	Condições de Operação.....	40
3.2.3	Modelos probabilísticos.....	40
3.2.3.1	Distribuição Weibull.....	41
3.3	CONFIABILIDADE APLICADA EM BOMBAS CENTRÍFUGAS .....	44
3.3.1	Tipos de Bombas Centrífugas.....	45
3.3.1.1	Bomba API “American Petroleum Institute” .....	47
3.3.1.2	Bomba ANSI “American National Standards Institute” .....	47
3.3.2	Consequências das condições de uso e instalação .....	48
3.3.2.1	Base de Fundação .....	48
3.3.2.2	Alinhamento .....	50
3.3.2.3	Configuração da tubulação .....	53
3.3.2.4	Esforço nas tubulações .....	56
3.3.2.5	Melhor Ponto de Eficiência (BEP) .....	59
3.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPITULO.....	61
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO APLICADO AO LCC .....</b>	<b>62</b>
4.1	PARAMETROS DE SIMULAÇÃO .....	62
4.1.1	Norma construtiva e confiabilidade inerente – 1º passo.....	63
4.1.2	Influência das práticas de Instalação e uso – 2º passo.....	64
4.1.2.1	Confiabilidade .....	64
4.1.2.1.1	Melhores Práticas de Instalação e Uso.....	64
4.1.2.1.2	Boas Práticas de Instalação e Uso .....	65
4.1.2.1.3	Práticas comum de Instalação e Uso.....	65
4.1.2.2	Base de custo .....	66
4.1.3	Redundância e perda de produção bruta – 3º passo .....	67
4.1.4	Estratégias de manutenção – 4º passo.....	68
4.1.4.1	Boas Práticas de Manutenção .....	68
4.1.4.2	Práticas comum de Manutenção.....	69
4.1.4.3	Base de custo e tempo para intervenções de manutenção.....	70
4.1.4.4	Análise de Viabilidade Econômica .....	71
4.2	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPITULO.....	71
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO APLICADO A ANÁLISE DE LCC .....</b>	<b>72</b>
5.1	ANALISE #1 .....	72
5.2	ANALISE #2.....	73
5.3	ANÁLISE #3.....	74
5.4	ANÁLISE #4 .....	76
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>77</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	77
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O objetivo desse capítulo é descrever as principais considerações referentes a definição do tema, problemas e premissas que levaram a esse estudo, assim como a delimitar a estrutura deste trabalho.

### 1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DA PESQUISA

Embora a agricultura seja praticada pela humanidade há mais de dez mil anos, os primeiros registros que temos de irrigação foram feitas pelos egípcios.

A agricultura foi a primeira razão para o ser humano necessitar recalcar água para o cultivo da lavoura.

Atualmente juntamente com os motores elétricos, as bombas centrífugas figuram seguramente entre os equipamentos mais utilizados no mundo. “Estima-se que mais de 10 bilhões desses equipamentos estejam em uso na atualidade” (BLOCH e BUDRIS, 2010).

Dessa forma uma análise aprofundada de suas principais características técnicas e econômicas pode contribuir com milhares de usuários na busca competitividade empresarial e consumo consciente dos recursos.

Principalmente o que tange os recursos naturais, que são limitados e tem sido um tema bastante atual e recorrente que devidamente gerido cria valor e até mesmo um diferencial para as empresas e beneficiando principalmente a sociedade de um modo geral.

### 1.2 OBJETIVOS

Apesar da simplicidade desses equipamentos, podemos entender que a sua utilização em massa desperta inúmeras possibilidades técnicas e econômicas.

Este trabalho se limita a apresentar uma aplicação prática de simulação e análise de custos relacionados.

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar detalhadamente as melhores práticas de análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC - Life Cycle Cost) aplicados para bombas centrífugas, associado aos principais conceitos clássicos da Engenharia de Confiabilidade consolidando os através do método de simulação de Monte Carlo.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Demonstrar o quanto a ferramenta de LCC explorada de forma detalhada, associada a conceitos fundamentais de confiabilidade e simulada através de métodos matemáticos e computacionais tendem a contribuir de forma consistente para tomadas de decisões economicamente mais assertivas.

Também apresentar o quanto as condições de instalação, uso e estratégias de manutenção quando não executadas ou planejadas de forma adequada distorcem os custos que poderiam ser otimizados durante todo o ciclo de vida desses equipamentos.

### 1.3 JUSTIFICATIVAS

Em um cenário, de tamanha abrangência na indústria onde normalmente essa categoria de equipamentos possui vida útil superior a 20 anos.

A aplicação dos conceitos LCC tornam-se indispensáveis para análise e aquisição desses ativos.

Também o fato de que bombas com baixa confiabilidade e sem uma estratégia adequada de manutenção geram um custo elevado principalmente por apresentarem altas taxas de falha e baixa disponibilidade operacional.

### 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O objetivo dessa pesquisa é descrever de forma quantitativa e descritiva o resultado de simulações de parâmetros de confiabilidade aplicado em equipamentos com padrões de qualidade distintas e submetidos a condições de operação e estratégias de manutenção adversas.

Os principais dados, parâmetros e conceitos utilizados de confiabilidade baseiam-se em parâmetros de pesquisa publicadas por (BARRINGER, 1997) junto a especialistas de confiabilidade.

A referência para base de custos, para viabilidade das simulações foram levantadas pelo próprio autor com base em sua experiência de 12 anos atuando na área de serviços e comercial em uma conceituada multinacional fabricante de bombas centrífugas.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos, visando esclarecer de forma abrangente os pontos determinantes apresentados pelo estudo.

Sendo que o primeiro capítulo, mostra uma introdução, os objetivos gerais e específicos e justificativas do trabalho.

O capítulo 2 apresenta de forma bastante específica o tema objeto do trabalho, com os principais conceitos sobre bombas centrífugas, Engenharia de Confiabilidade e o efeito sobre LCC aplicado e também pontos teóricos mais significativos quanto a simulação de Monte Carlo.

O capítulo 3 mostra as principais características construtivas e aspectos técnicos das bombas centrífugas conforme comumente empregado em diversos setores da indústria.

O capítulo 4 descreve detalhadamente a planilha de cálculos e a estrutura empregada de custos e parâmetros de confiabilidade utilizados para viabilizar as simulações conforme empregado no trabalho.

O capítulo 5 apresenta um comparativo realizado a partir de simulações de Monte Carlo entre alguns equipamentos que possuem normas construtivas distintas alterando-se a estratégia de manutenção e parâmetros de confiabilidade.

E o capítulo 6 traz a conclusão final do trabalho.

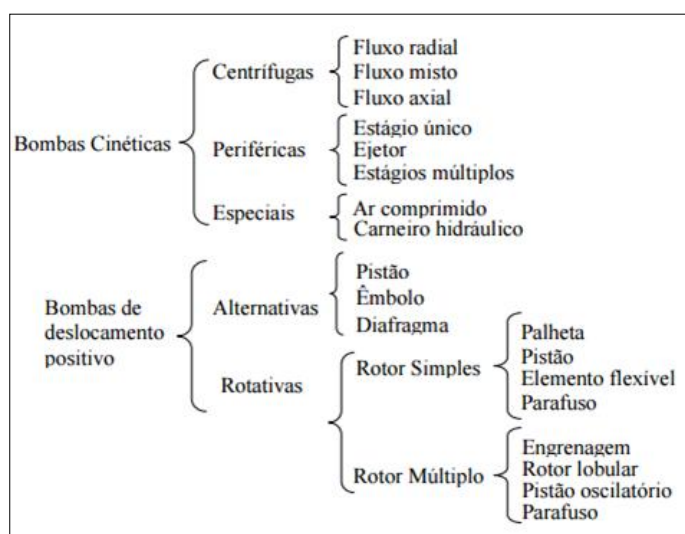
## 2 LCC DE BOMBAS CENTRÍFUGAS E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

O objetivo nesse capítulo é apresentar os principais conceitos que envolvem o desenvolvimento desse trabalho.

### 2.1 BOMBAS CENTRÍFUGAS

Não existe atualmente disponível, uma terminologia homogênea ou até mesmo padronizada sobre bombas, pois há vários critérios para designá-las. Entretanto, podemos classificá-las em duas grandes categorias conforme pode ser observado na Figura 2.1.1

Figura 2.1.1 Classificação geral das bombas



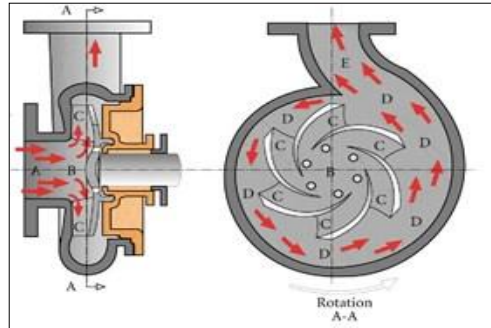
Fonte: (ANGELO, 2016).

Entre todas as designações, as bombas centrífugas em sua simplicidade e versatilidade certamente figuram como o tipo mais empregado em todo o mundo, também por suas características de utilização. Basicamente as bombas centrífugas são turbomáquinas que transferem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro.

Conforme Figura 2.1.2 existem diversas regiões e fases que regem o princípio de funcionamento das bombas centrífugas.



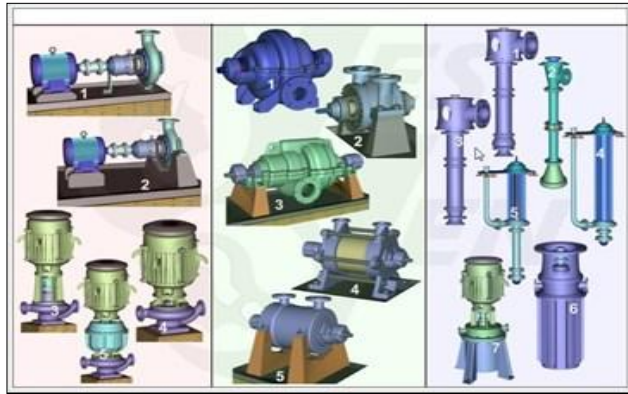
Figura 2.1.2 Princípio de Funcionamento



Fonte: (EMILIO MENIN, 2009).

Na região **A** próximo ao bocal de sucção da bomba e região **B** no olho ou centro do rotor, o fluido apresenta baixa velocidade e baixa pressão sempre 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**, no ponto de descarga ou recalque da bomba o fluido apresenta alta pressão e baixa velocidade sendo transferido ao sistema. Embora as bombas centrífugas possam apresentar diversas configurações, formatos e tamanhos conforme apresentado na Figura 2.1.3 inevitavelmente irão obedecer esse mesmo princípio de funcionamento.

Figura 2.1.3 Tipos de bombas centrífugas

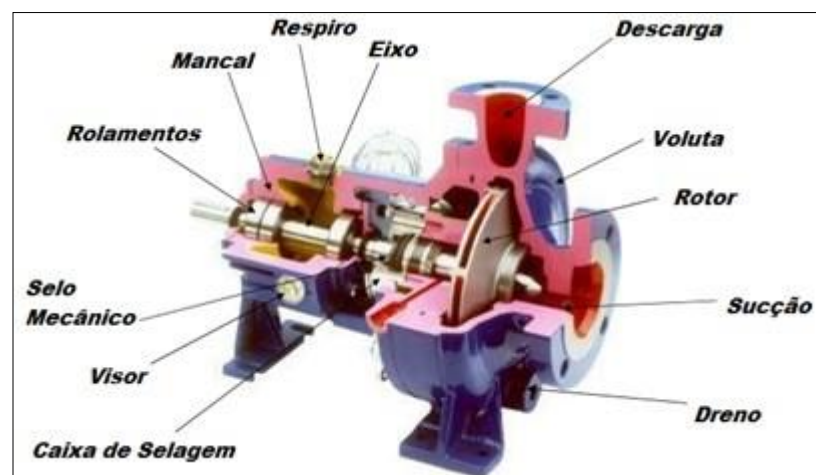


Fonte: (YESYEN, 2015).

As bombas centrífugas em sua esmagadora maioria mecanicamente podem ser consideradas equipamentos simples, conforme pode ser observado na

Figura 2.1.4. No entanto sua correta aplicação exige conhecimentos bem específicos de hidráulica dos fluidos.

Figura 2.1.4 Configuração básica das bombas centrífugas.



Fonte: (EMILIO 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.

- Mancal, tem a função de sustentar o eixo de acionamento.
- Selo mecânico, faz a vedação dinâmica do conjunto.

## 2.2 LCC - CUSTO DO CICLO DE VIDA

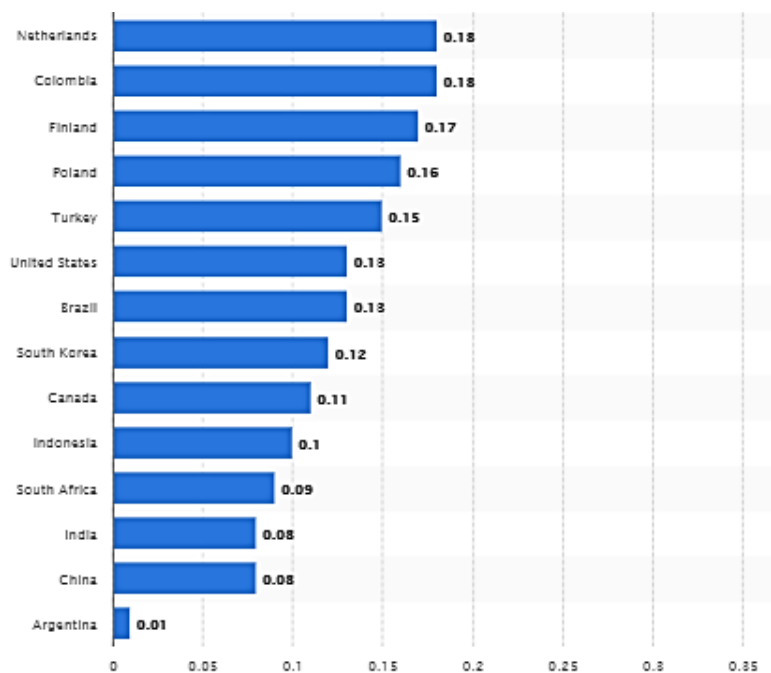
O LCC também conhecido como o Custo Total de Propriedade (TCO), é um sistema que rastreia e acumula os custos e receitas reais atribuíveis ao objeto de estudo durante toda a sua vida útil, seja ele um ativo, estrutura ou sistema. Envolve seguir uma metodologia para identificar e quantificar todos os componentes de uma equação, mantendo em consideração fatores econômicos relevantes em termos de custo inicial de capital, e demais custos relacionados a fim de permitir a realização de avaliações e análises comparativas de custos ao longo de um período de tempo específico.

Pode ser utilizado tanto na aquisição de novos ativos para projetos, ou até mesmo na decisão de descontinuar um equipamento ou uma linha de produção. Quando usado como uma ferramenta de comparação entre possíveis alternativas para um projeto, o LCC mostrará a solução mais econômica dentro dos limites de dados disponíveis. Sendo o objetivo principal dessa ferramenta auxiliar na tomada de decisão considerando o melhor custo benefício ao longo do tempo e não somente o custo inicial de compra e ou instalação e funcionamento.

Além das razões econômicas para usar o LCC, muitas organizações estão cada vez mais conscientes do impacto ambiental de seus negócios, e estão considerando a eficiência energética como uma maneira de reduzir as emissões de gases e preservar recursos naturais. Para a maioria das instalações, a energia vitalícia e os custos de manutenção irão dominar os custos do ciclo de vida. Por isso, é importante determinar com precisão o custo atual da energia, o preço anual esperado da energia escalada para a vida estimada. Na

Figura 2.2.1 é possível comparar os custos da energia elétrica entre alguns países em Dólar (USD) por Kilowatts hora em 2018.

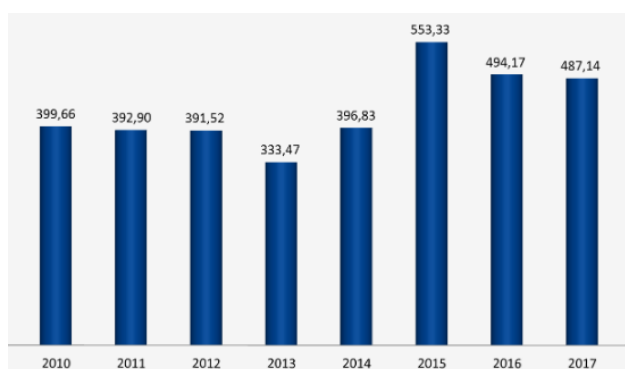
Figura 2.2.1 Comparação energia elétrica por países (USD / kWh)



Fonte: (SÖNNICHSEN, 2018).

Na Figura 2.2.2 apresenta a evolução anual dos custos da energia elétrica no Brasil para o setor industrial em Reais (R\$) por Megawatts hora.

Figura 2.2.2 Custo Médio da Energia Elétrica industrial no Brasil (R\$/MWh).

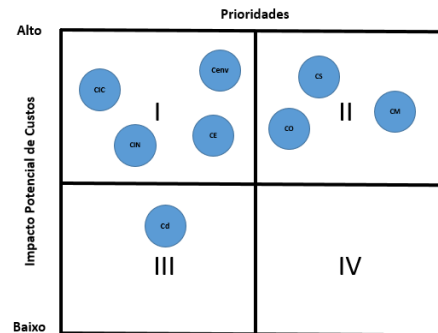


Fonte: (FIRJAN, 2017).

Outros elementos, como os custos de manutenção, materiais de consumo ou sobressalentes, tempo de inatividade, descomissionamento e preservação do ambiente podem frequentemente ser estimados com base em dados históricos da instalação.

Dependendo do processo, os custos do tempo de inatividade podem ser mais significativos que energia ou manutenção. Assim, ao analisar a Figura 2.2.3 é importante analisar e priorizar através de uma matriz os temas que eventualmente mais afetarão os custos do projeto ao longo do tempo, avaliar diversos cenários, definir e validar aquele que trará o melhor resultado financeiro ao projeto.

Figura 2.2.3 Exemplo da Matriz de Decisão LCC



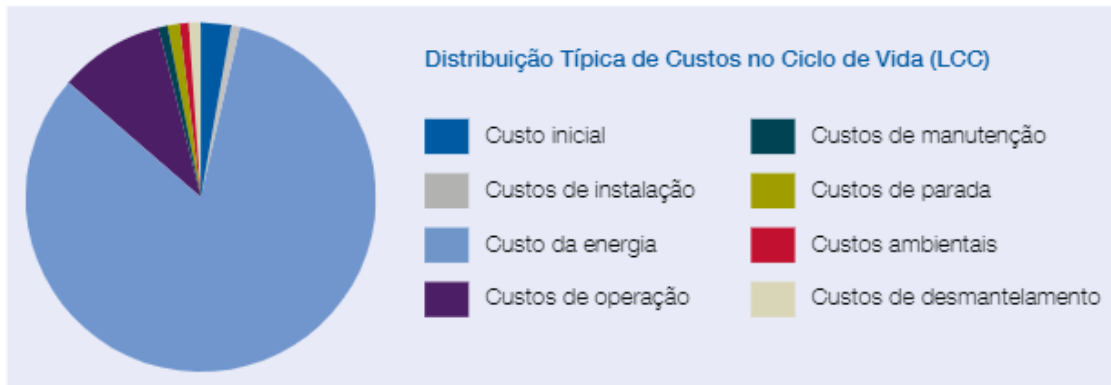
Fonte: (MCC, 2020)

### 2.3 LCC APLICADO PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS

Os sistemas de bombeamento respondem por quase 20% da demanda mundial de energia elétrica e variam de 25 a 50% do uso de energia a depender do tipo de segmento e planta industrial.

Conforme pode ser observado na Figura 2.3.1, tipicamente os custos de energia para as bombas centrífugas são os mais dispendiosos a longo do ciclo de vida.

Figura 2.3.1 Custo típicos no ciclo de vida das bombas centrífugas



Fonte: (SULZER, 2015).

Embora as bombas sejam normalmente adquiridas como componentes individuais, eles fornecem um serviço somente quando operam como parte de um sistema. Sendo que a energia consumida e os materiais utilizados por um sistema dependem do projeto da bomba, do projeto de instalação e de como o sistema é operado. Esses fatores são interdependentes.

Além disso, eles devem ser cuidadosamente combinados entre si e permanecer dessa forma durante toda sua vida útil para garantir os menores custos operacionais de energia e manutenção, além de visar outros benefícios como disponibilidade operacional.

Na equação 1 é possível observar os principais elementos que compõe o LCC aplicáveis a bombas centrífugas conforme definido pelo (EUROPUMP, 2001).

$$LCC = C_{ini} + C_{ins} + C_{ene} + C_{ope} + C_{man} + C_{ina} + C_{amb} + C_{des} \quad (1)$$

O Hydraulic Institute (HI), foi estabelecido em 1917 sendo a maior associação de produtores de bombas da América do Norte, responsável pelo desenvolvimento dos mais elevados padrões adotados para indústria como classe mundial.

O (EUROPUMP, 2001) foi estabelecido em 1960 e representa 15 associações nacionais de bombas e representa mais de 400 fabricantes na Europa.

Responsável por promover o desenvolvimento da indústria de bombas europeia através de publicações técnicas e assuntos relacionados. A seguir será apresentado a definição dos principais custos conforme definido pelas referidas instituições.

### 2.3.1 Custos Iniciais ( $C_{ini}$ )

Os custos iniciais normalmente é uma pequena parte do custo do ciclo de vida para bombas projetadas para altas taxas de uso.

Portanto decisões importantes devem ser tomadas ainda na fase de projeto, de acordo com critérios e padrões pré-estabelecidos ou demandas específicas.

Uma escolha importante é a qualidade do equipamento que está sendo selecionado.

Normalmente haverá opções em relação a materiais com diferentes taxas de desgaste, rolamentos, vedações mais pesadas ou pacotes de controle mais extensos, todos aumentando vida útil da bomba.

Estas e outras escolhas podem incorrer em custos iniciais mais altos, mas reduzindo os custos finais do LCC.

Por outro lado, sistemas de tubulação e acessórios também costumam requerer bastante atenção.

Quanto menor os diâmetros instalados, menor será o custo de aquisição e instalação.

No entanto, esse tipo de instalação requer uma bomba mais potente resultando em maiores custos iniciais e posteriormente também operacionais.

Visto também que, tamanhos menores de tubos instalado na entrada de uma bomba reduzirá a capacidade de sucção positiva líquida disponível (NPSHd), exigindo assim uma bomba maior e de velocidade mais lenta, que será tipicamente mais caro.

Os custos iniciais normalmente são limitados, fixos e exclusivos, feitos uma única vez durante a concepção do projeto e devem ainda incluir outros itens:

- Engenharia (projeto e desenhos, questões regulatórias)
- Aquisição completa do equipamento, acessórios e materiais instalação
- Frete, armazenagem e administração dos pedidos de compra
- Deligênciamento, testes e inspeções junto ao fornecedor
- Estoque de peças sobressalentes para reposição
- Treinamentos específicos para operação e manutenção

### 2.3.2 Custos Instalação (C ins), comissionamento e start-up

A instalação pode ser realizada pelo fornecedor do equipamento ou contratado pelo usuário final. Essa decisão depende de vários fatores determinantes, relacionados a prazo, as habilidades, ferramentas e equipamentos necessários, requisitos contratuais, regras de trabalho que regem o local de instalação e a disponibilidade e competências do pessoal de instalação. Cuidados devem ser tomados para seguir as instruções de instalação cuidadosamente.

Por fim o processo de comissionamento e start-up consiste na aplicação integrada de um conjunto de técnicas e procedimentos de engenharia planejados para verificar, inspecionar e testar cada componente físico do empreendimento, desde os individuais, como peças, instrumentos e equipamentos, até os mais complexos, como módulos, subsistemas e sistemas.

Requer muita atenção às instruções do fabricante do equipamento para o partida inicial e operação.

Uma lista de verificação deve ser usada para garantir que o equipamento e o sistema estão operando dentro dos parâmetros especificados.

Os principais custos de instalação e comissionamento incluem o seguinte:

- Supervisão de montagem e comissionamento
- Manuseio e transporte do equipamento, acessórios e materiais
- Confecção das bases de fundação e montagem do equipamento
- Instalação de estrutura, suportes, acessórios e tubulações de processo
- Serviços topográficos e de alinhamento entre eixos do conjunto.
- Instalação elétrica de acionamento, supervisório e instrumentação
- Serviços de isolamento, pintura e identificação do conjunto
- Conexão de sistemas auxiliares água de selagem e outras utilidades
- Provisões para lavagem ou sopragem das linhas antes da partida
- Comissionamento do sistema
- Avaliação de desempenho no start-up



A entrega final normalmente ocorre depois que a operação bem-sucedida é demonstrada. Uma instalação completa inclui a transferência da operação do equipamento e requisitos de manutenção através do treinamento do pessoal responsável pela operação do sistema.

### 2.3.3 Custos de energia (C ene)

O consumo de energia é frequentemente um dos maiores elementos de custo e pode dominar o Custo do Ciclo de Vida, especialmente se as bombas operarem mais de 2000 horas por ano.

O consumo energético é calculado através dos dados colhidos no projeto do sistema e pode ser obtido através da equação 2 e dependendo também das características do motor elétrico.

$$P(kW) = \frac{\gamma * Q * H}{\eta_b * \eta_m} \quad (2)$$

Onde:

P – Potência (kW)

$\gamma$  – Peso Específico do líquido (kN/m<sup>3</sup>)

Q – Vazão (m<sup>3</sup>/s)

H – Altura Manométrica (m.c.a)

$\eta_b$  – Rendimento da bomba

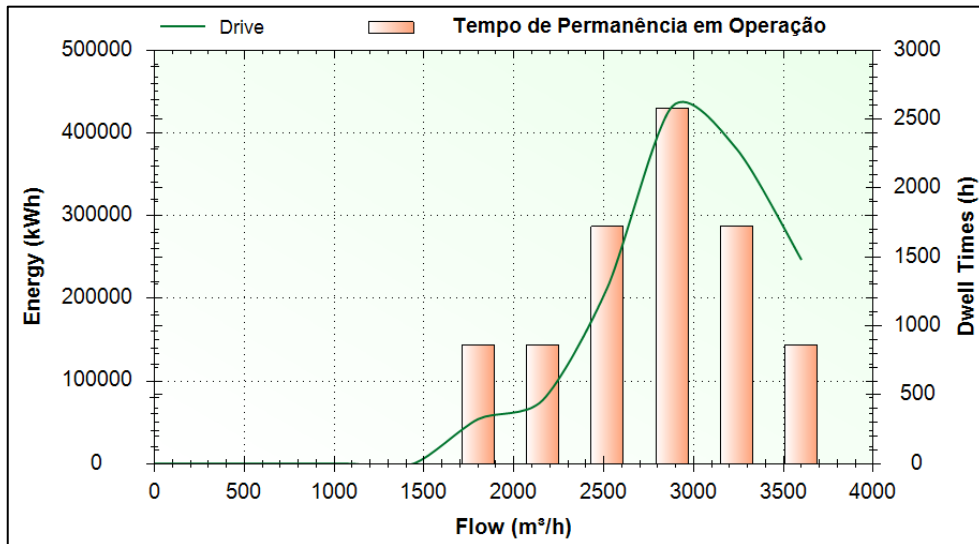
$\eta_m$  – Rendimento do motor

Onde o rendimento global é o produto entre o rendimento do motor e bomba.

Os métodos de cálculo da energia são relativamente simples quando a bomba é utilizada num único ponto de funcionamento.

Mas se as solicitações ao sistema são muito variáveis no tempo, então é recomendado utilizar um registro como exemplificado na Figura 2.3.2 com consumo horário para se efetuar o respectivo cálculo.

Figura 2.3.2 Exemplo de perfil de consumo anual de um equipamento



Fonte: Autor.

Ainda algumas situações torna a análise mais complexa, no caso de bombas em funcionamento paralelo e/ou se a bomba for utilizada com variadores de frequência.

No funcionamento paralelo, deverão ser efetuados cálculos separados para os vários pontos de funcionamento, aproximando em seguida os volumes bombeados ou horas de funcionamento relativos a cada um destes.

Já uma bomba com variador de frequência tem um número infinito de pontos de funcionamento onde rendimento geral do sistema fica difícil de ser calculado com exatidão. De qualquer forma, a utilização desses dispositivos certamente tende a contribuir significativamente com a redução no consumo de energia, dado que essa varia de forma proporcional ao cubo da variação da rotação conforme equação 3, assegurando um curto prazo para retorno de investimento.

$$P1 = P0 * \left(\frac{n1}{n0}\right)^3 \quad (3)$$

Onde:

P1 – Potência Final

P0 – Potência Inicial

$n_1$  – Rotação Final

$n_0$  – Rotação Inicial

Os custos energéticos inclusive de serviços auxiliares também devem ser incluídos.

Estes custos podem variar e fazer referência a circuitos de aquecimento ou arrefecimento de fluidos de processo. Nestes casos devem ser incluídos os custos do fluido, filtragem, circulação e/ou dissipação de calor etc.

#### 2.3.4 Custos de Operação (C ope)

Os custos de operação comumente são os associados à mão-de-obra relacionados com a operação do sistema.

Estes podem variar significativamente a depender da complexidade e função do sistema.

É diferente o nível de supervisão ou verificações necessárias por exemplo se compararmos uma bomba instalada em ambientes corrosivos se comparado a um sistema semelhante com fluidos menos danosos como água por exemplo.

É fato que a verificação e análise periódica das condições de funcionamento do sistema pode alertar os operadores para eventuais perdas de desempenho do sistema.

E custos adicionais ou ferramentas específicas são necessárias para medir vibrações, temperaturas, ruído, consumo energético, vazões, pressão a depender do ambiente ou criticidade dos equipamentos

#### 2.3.5 Custos de Manutenção (C man)

A longevidade esperada para uma bomba, requer uma manutenção regular e eficiente. As recomendações dos fabricantes auxiliam quanto a frequência e a natureza da manutenção periódica.

Os custos dependem do tempo, frequência, nível de ferramentas e especialização necessária para realização dos serviços, mas também dos custos dos materiais.

O projeto certamente pode influenciar estes custos por aplicação específica de materiais, seleção dos componentes e mesmo do planejamento e facilidade de acesso aos componentes a serem intervencionados contribuindo com a manutenibilidade.

O planejamento de manutenção comumente está relacionado a cultura organizacional e pode ser cumprido com menor frequência, mas com maior atenção aos detalhes ou com maior frequência, mas com intervenções mais simples.

As maiores atividades normalmente ocorrem em paradas programadas e requerem frequentemente a remoção da bomba do local de instalação para as oficinas ou até mesmo envio ao fabricante.

Durante esse tempo a unidade está indisponível podendo haver perda total na produção ou um custo de substituição temporária.

Estes custos podem ser minimizados por uma programação cuidadosa e detalhada de acordo com a criticidade do equipamento para o processo.

O custo total da manutenção de rotina é o resultado do produto dos custos por intervenção pelo número de intervenções esperadas durante o ciclo de vida da bomba.

Embora as falhas aleatórias não possam ser previstas, podem ser acompanhadas de forma preditiva e estimadas estatisticamente pelo cálculo do tempo médio entre falhas.

#### 2.3.6 Custos de Inatividade ( $C_{ina}$ )

O custo de inatividade por paradas imprevisíveis e de perdas de produção são uma parcela muito significativa no valor Custo de Ciclo de Vida e pode aproximar dos custos energéticos ou de peças de substituição a depender da função exercida no respectivo processo de produção.

A depender da escala de produção os custos de paradas são inaceitáveis pois representam custos muito superiores à instalação de um equipamento by-pass ou de substituição.

Se for utilizado um equipamento reserva, o dispêndio financeiro inicial será mais elevado, no entanto os custos de manutenção quando não programadas incluirão basicamente apenas os custos de reparação.

O custo pela perda de produção ou de indisponibilidade podem ser considerados dependente do tempo de parada e devem ser analisados para cada caso específico.

### 2.3.7 Custos Ambientais (C amb)

O custo dos danos ocasionados por fluidos contaminantes durante o tempo de funcionamento ou vida de um sistema de bombeamento varia bastante dependendo da natureza do produto bombeado.

Exemplos de contaminação ambiental podem incluir: destruição da caixa de selagem, bombeamento de produtos corrosivos, uso de peças contaminadas etc.

Os custos de infração ambiental deverão ser incluídos, sob o risco de representarem externalidades.

### 2.3.8 Custos Descomissionamento (C des)

Na maioria dos casos, o custo para desativar um sistema de bombeamento pode ter poucas variações em relação a diferentes concepções.

Existem procedimentos legais e regulamentares para líquidos tóxicos, radioativos ou qualquer outro tipo agressivo.

Quando a destruição tem um custo demasiado elevado, o Custo do Ciclo de Vida torna-se particularmente sensível à vida útil do equipamento.

### 2.3.9 Custos Totais do Ciclo de Vida - LCC

Os custos estimados para as várias modalidades, depois de somadas permitem uma comparação das diferentes soluções analisadas.

Existem também fatores financeiros a serem tomados em consideração no desenvolvimento do LCC como:

- Preços atuais da energia;
- Atualização do valor anual da energia;
- Taxa de inflação;
- Taxa de juros;
- Vida útil esperada para o equipamento.

Adicionalmente o usuário deve decidir quais os custos esses fatores devem ser incluídos, tais como a manutenção, paradas, ambiental, descomissionamento e outros custos importantes.

## 2.4 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A simulação de Monte Carlo é um método, de uma classe de métodos estatísticos que se baseiam em amostragens aleatórias massivas para obter resultados numéricos.

Onde através de sucessivas e aleatórias simulações calcula-se probabilidades para solucionar problemas.

Segundo (DONALD W. BENBOW, 2009) na simulação Monte Carlo, cálculos repetidos são feitos usando valores selecionados aleatoriamente com base nas distribuições de probabilidade que descrevem cada elemento do modelo podendo esse ser o mais variado possível.

A simulação Monte Carlo embora não venha envolver uma matemática complexa, requer um uso extensivo de recurso computacional de acordo com cada evento possível do modelo que deve ser repetidamente amostrado sobre o tempo de missão desejado.

Segundo (MORAIS, 2010) a finalidade da Simulação de Monte é descrever as características possíveis de uma variável dependente “y”, depois determinar os possíveis valores das variáveis independentes. Se em qualquer modelo à variável “x” apresentar variáveis aleatórias, a variável dependente “y” também apresentará variáveis aleatórias.

Conforme exposto pôr (MORAIS, 2010) o método de Monte Carlo consiste na geração artificial de valores das variáveis de interesse, com auxílio de números ao acaso ou números aleatórios.

Podemos entender por números aleatórios qualquer sequência numérica em que os números são invariavelmente completamente independentes entre si.

Estes números aleatórios são gerados por um sistema próprio ou gerador de número aleatório.

Resumidamente podemos sintetizar a aplicação do método de Monte Carlo dentre as seguintes etapas:

- Identificar as distribuições estatísticas de probabilidade das referidas variáveis aleatórias que são objetos de estudo;

- Estruturar as distribuições de probabilidades acumuladas para todas as variáveis identificadas;
- Definir os intervalos randômicos compatíveis para cada variável;
- Gerar os números aleatórios através de ferramentas apropriadas;
- Simular os experimentos quantas vezes necessárias para acomodar os custos.

Para este trabalho as simulações de Monte Carlo serão realizadas através de planilhas de cálculos.

## 2.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPITULO

Nesse capítulo foi apresentado os principais custos relacionados ao ciclo de vida de bombas centrífugas e também uma breve introdução do método de simulação de Monte Carlo.

Embora as bombas centrífugas sejam consideradas equipamentos de construção e funcionamento relativamente simples, foi possível observar nesse capítulo diversos fatores de nível técnico e econômico que necessitam ser observados minuciosamente a fim de se obter o menor custo total de propriedade ao final de sua vida útil.

Dados que corretamente analisados e associados podem ser aplicados a métodos de simulação e tendem a ser uma ferramenta de trabalho importante para projeção e análise de cenários futuros antes das tomadas de decisão.

No próximo capítulo será apresentado alguns referenciais teóricos e conceitos básicos da Engenharia de Confiabilidade.

Também será apresentado e como determinadas condições de instalação, uso e estratégias de manutenção influenciam esses parâmetros e os respectivos custos relacionados a sua falta.

### 3 ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

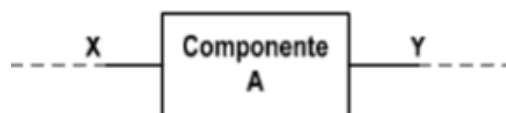
Este item apresenta as principais definições e conceitos da Engenharia de Confiabilidade, bem como sua aplicação prática para bombas centrífugas que apoiarão o desenvolvimento deste trabalho.

#### 3.1 DEFINIÇÕES

##### 3.1.1 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 e pode ser esquematicamente verificado na Figura 3.1.1.

Figura 3.1.1 Representação de um componente



Fonte: AUTOR.

Dado possuir um tempo de vida finito e características de ciclo de vida de uma população de componentes podem ser normalmente representadas por determinado padrão de distribuições de confiabilidade.

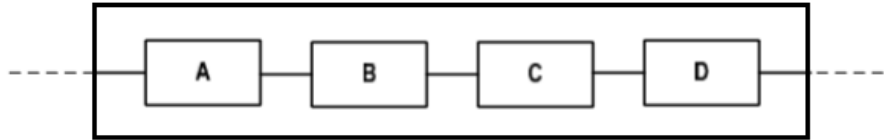
##### 3.1.2 Equipamento

Conjunto de componentes agrupados que operam para executar uma função específica.

Na Figura 3.1.2 segue um modelo de um equipamento composto por quatro componentes em série (se qualquer componente falhar, o equipamento falha).



Figura 3.1.2 Representação de um equipamento com componentes em série



Fonte: AUTOR

Um bem reparável, quase sempre depois de passar ao estado de falha pode ser reparado e restituído de forma a perfazer as funções para as quais é requisitado se sua condição assim permitir.

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.

### 3.1.3 Sistema

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

### 3.1.4 Falha

É a impossibilidade de um bem realizar uma função predeterminada. Seja este um componente, equipamento ou sistema. Segundo Xenos (2004), 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.

#### 3.1.4.1 Tempo Médio para Falha (TMPF)

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

#### 3.1.4.2 Tempo Médio para Reparar (TMPR)

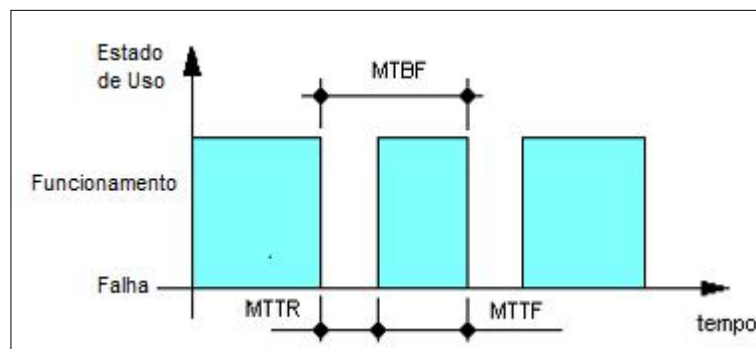
É o tempo verificado para o reparo de componentes, obtido de uma amostra nas mesmas condições de uso do componente desejado. Também conhecido como MTTR "*Mean Time to Repair*".

#### 3.1.4.3 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.

A Figura 3.1.3 é possível verificar os principais intervalos a ser considerado.

Figura 3.1.3 Ilustração dos intervalos de manutenção



Fonte: (ANGELO, 2016).

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

### 3.1.5 Manutenibilidade

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.

### 3.1.6 Disponibilidade

Segundo a (ABNT, 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 recursos e aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos invariavelmente estejam assegurados.

### 3.1.7 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. (ABNT, 1994)

## 3.2 CONFIABILIDADE

Segundo (DONALD W. BENBOW, 2009), 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 de suas funções devem ser consideradas.

São necessários dados massivos com tamanho e acuracidade suficientes. Isso inclui projetar, construir, testar, usar, manter, e descartar um produto através do gerenciamento de seu ciclo de vida.

### 3.2.1 Métricas da confiabilidade

De acordo com (BARRINGER, 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 3 e 4 são referentes à probabilidade de falha  $F(t)$  e de sobrevivência  $R(t)$ .

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N_0} \quad (4)$$

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} \quad (5)$$

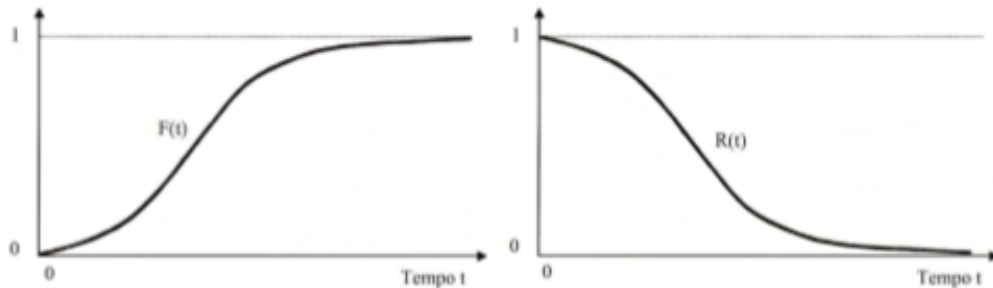
Notar que as Equações 4 e 5 são aplicáveis quando todos os componentes seguem a mesma distribuição de probabilidade.

Sabe-se que as mesmas equações anteriormente apresentadas são complementares, conforme se verifica na equação 6.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (6)$$

Na Figura 3.2.1 são representadas as curvas referentes às funções  $F(t)$  e  $R(t)$ , verificando-se assim a sua complementação:

Figura 3.2.1 Representação das funções  $F(t)$  e  $R(t)$



Fonte: Adaptado (DONALD W. BENBOW, 2009).

Conforme ilustrado é possível verificar 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.

#### 3.2.1.1 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.

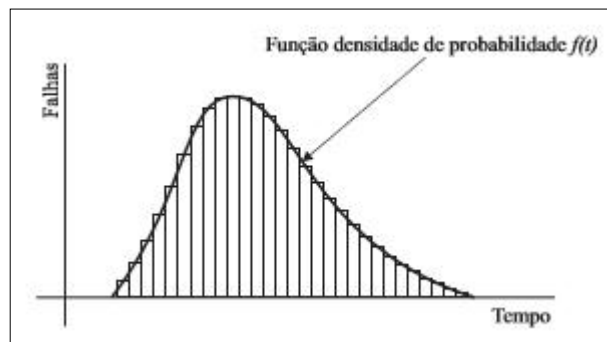
Para isso deve-se selecionar uma distribuição de probabilidade apropriada ao sistema a ser analisado.

Ou seja, a distribuição das falhas no tempo é 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 adere e representa o comportamento geral do sistema.

A função densidade de probabilidade representada na Figura 3.2.2 é relação constante entre a frequência de ocorrência das falhas no tempo.

Figura 3.2.2 Função densidade de probabilidade



Fonte: Adaptado (DONALD W. BENBOW, 2009).

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 6 como:

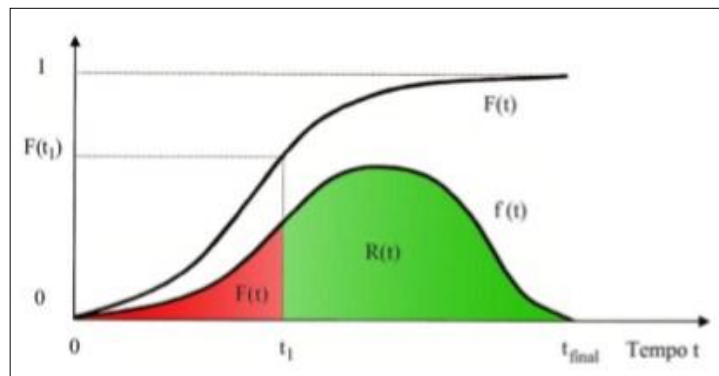
$$R(t) = 1 - F(t) \quad (7)$$

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 7.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (8)$$

A Figura 3.2.3 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  $t_{final}$ .

Figura 3.2.3 Representação das relações



Fonte: Adaptado (DONALD W. BENBOW, 2009).

Pode se observar, para um dado instante  $t$ , que  $R(t)$  é complementar à  $F(t)$ .  
Utilizando as equações 6 e 8 obtém-se a equação 9 referente a  $R(t)$ .

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t).dt \quad (9)$$

Onde  $R(t)$  caracteriza a probabilidade do componente manter sua função sem falhas durante toda a missão até ao momento pretendido  $t$ , assim como  $F(t)$  caracteriza a probabilidade do componente perder sua função ou falhar até ao momento pretendido.

### 3.2.2 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. Características

importantes da vida do produto, tais como a confiabilidade ou a probabilidade de falha em um período de tempo específico, a vida média e a taxa de falha ou insucesso podem ser analisadas. Para uma análise de dados de vida, é necessário:

1. Reunir dados de vida do produto.
2. Selecionar uma distribuição probabilística adequada capaz de aderir aos dados e modelar a vida útil do produto.
3. Estimar os parâmetros através da distribuição dos dados.
4. Gerar gráficos e resultados que estimam as características de vida do produto, tais como a confiabilidade ou a vida significa.

### 3.2.2.1 Condições de Operação

Referem-se às condições de projeto aferidas em relação ao ambiente de uso e às variáveis de projeto inicialmente fixadas. Essas condições necessitam ser bem definidas e executadas dado que sua função pode não se manter, se as premissas consideradas anteriormente estabelecidas forem alteradas. É importante definir todos os padrões de pressão, temperatura, umidade, esforços, deformações, número de ciclos, distância percorrida etc., para assegurar os parâmetros de confiabilidade inicialmente proposta.

### 3.2.3 Modelos probabilísticos

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.

Nesse trabalho em específico, iremos discorrer e adotar apenas a distribuição Weibull a fim de evitarmos qualquer tipo de dispersão quanto aos objetivos propostos.



### 3.2.3.1 Distribuição Weibull

A distribuição postulada por Waloddi Weibull (1951) é a que melhor representa eventos relacionados 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.

A função densidade de falha para a distribuição Weibull tripamétrica é dada pela Equação 10.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^\beta} \quad (10)$$

Na distribuição bipamétrica, este período inicial é desconsiderado conforme dado na Equação 11, visto que o período de vida útil é muito maior que este período inicial.

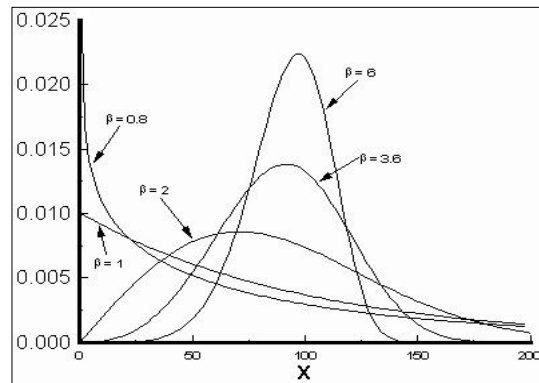
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta} \quad (11)$$

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 é o parâmetro de forma, normalmente representado por ( $\beta$ ) Figura 3.2.4.

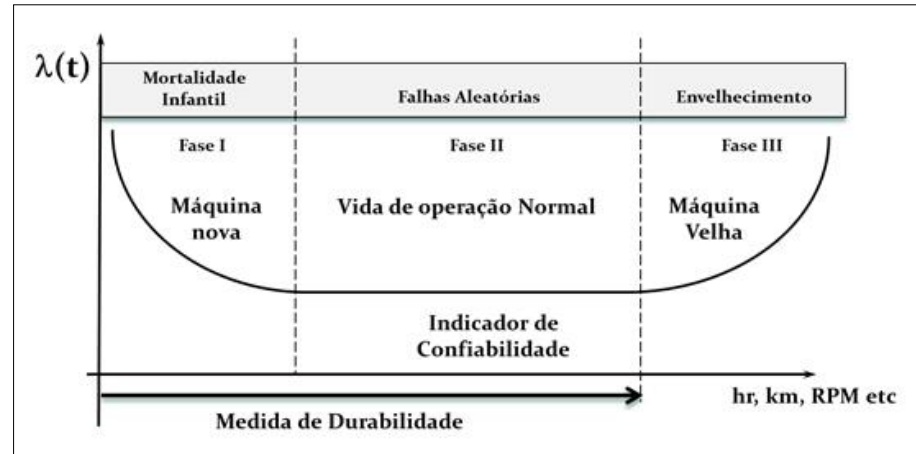
Figura 3.2.4 Influência do Beta na Função Densidade Weibull



Fonte: (DONALD W. BENBOW, 2009).

Esse parâmetro permite representar de forma bastante consistente o evento de falha nos três períodos mais importantes e significativos do ciclo de vida do produto conforme descrito na Figura 3.2.5.

Figura 3.2.5 Curva da banheira



Fonte: Autor.

Onde pode se entender as fases da seguinte forma:

- FASE I - A taxa de falhas decrescente, caracterizada por falhas de especificação de projeto, processos ou até mesmo intervenções indevidas de manutenção de processo, chamado também de período de

mortalidade Infantil. Nessa fase invariavelmente a estratégia de manutenção mais adequada é a corretiva associado a revisão de projeto.

- FASE II - Onde as taxas de falhas são aleatórias, sem grandes previsibilidades 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 ou monitoramento de condição.
- 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 12.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (12)$$

A Equação 13 refere-se à Função de Probabilidade Acumulada de falha, após o tempo  $(t)$  de funcionamento.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (13)$$

E o MTBF calculado conforme Equação 14.

$$MTBF = t_0 + \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (14)$$

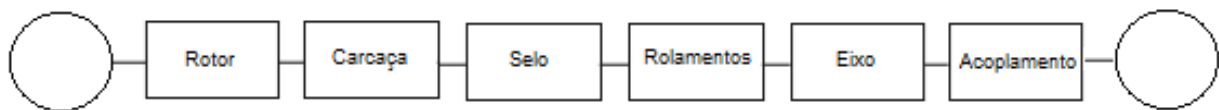
### 3.3 CONFIABILIDADE APLICADA EM BOMBAS CENTRÍFUGAS

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

Uma bomba centrífuga pode ser representada esquematicamente por um sistema em série conforme Figura 3.3.1.

Assim, se qualquer componente falhar, então a bomba perde a função e inevitavelmente deve ser reparada.

Figura 3.3.1 RBD de uma bomba centrífuga



Fonte: Adaptado (BLOCH e BUDRIS, 2010).

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 (BLOCH e BUDRIS, 2010) apresentam “fatores de uso que influenciam diretamente na confiabilidade das bombas” e devem ser observados.

Esses fatores são apresentados na Figura 3.3.2

Figura 3.3.2 Fatores determinantes para confiabilidade das bombas

Tipo	Instalação	Aplicação		Operação	Manutenção
Sucção Axial	Base	Mecânica	Hidráulica	Start-up	Treinamento
Dupla Sucção	Alinhamento	Selo	BEP	Parada	Ferramentas
Multiplo 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		

Fonte: Adaptado (BLOCH e BUDRIS, 2010).

Diversos desses fatores serão abordados a seguir nesse trabalho, visando elucidar o desenvolvimento do trabalho.

### 3.3.1 Tipos de Bombas Centrífugas

As bombas de sucção axial atualmente constituem a grande maioria utilizada na indústria.

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

Já as bombas de dupla sucção de um estágio são consideradas equilibradas axialmente por simetria, reduzindo os esforços e cargas a serem absorvidos nos mancais, assegurando uma expectativa de vida útil mais longa dos rolamentos.

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

Sua construção pode ser observada na

#### Figura 3.3.3

Figura 3.3.3 Bomba de Dupla Sucção

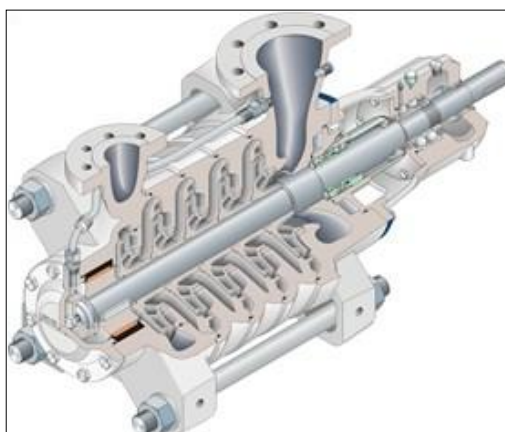


Fonte: (SULZER, 2015).

Já as bombas multiestágio são usadas em instalações para atender requisitos elevados altura manométrica.

Nesse caso, diversos rotores são conectados em série e o fluxo é guiado desde a saída de uma fase até a entrada da próxima, conforme Figura 3.3.4.

Figura 3.3.4 Bomba múltiplos estágio



Fonte: (SULZER, 2015).

### 3.3.1.1 Bomba API “*American Petroleum Institute*”

As bombas API cumprem aos elevados requisitos do Instituto Americano do Petróleo Padrão 610. A Figura 3.3.5 apresenta um equipamento com construção típica API.

Figura 3.3.5 Construção típica API



Fonte: (BLOCH e BUDRIS, 2010).

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

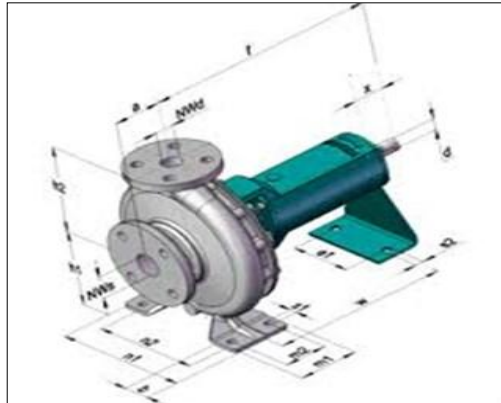
Este estilo é quase sempre uma escolha exclusiva para aplicações na indústria de refinaria de petróleo, onde ele lida com aplicações de elevada temperatura e pressão de natureza mais agressiva muito comum nas refinarias.

### 3.3.1.2 Bomba 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 3.3.6 pode se observar as principais dimensões padronizadas.

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

Figura 3.3.6 Construção típica ANSI.



Fonte: (BLOCH e BUDRIS, 2010).

### 3.3.2 Consequências das condições de uso e instalação

Todo o equipamento possui uma confiabilidade inerente, o que resulta em uma taxa básica de falhas.

A prática de instalação e uso altera essa taxa de falha básica para produzir a taxa de falha específica relacionada a condição específica de instalação e uso.

#### 3.3.2.1 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 3.3.7 apresenta uma instalação de ótima qualidade onde se deve fazer o enchimento total de argamassa.



Figura 3.3.7 Base de Fundação



Fonte: (SULZER, 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 dados extraídos de uma pesquisa realizada por (BARRINGER, 1997) nos Estados Unidos, para quantificar como as práticas de instalação uso e práticas de manutenção 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 conhecidos no mundo para vincular como determinadas práticas afetam a quantificação da vida útil do componente e respectivamente sua confiabilidade.

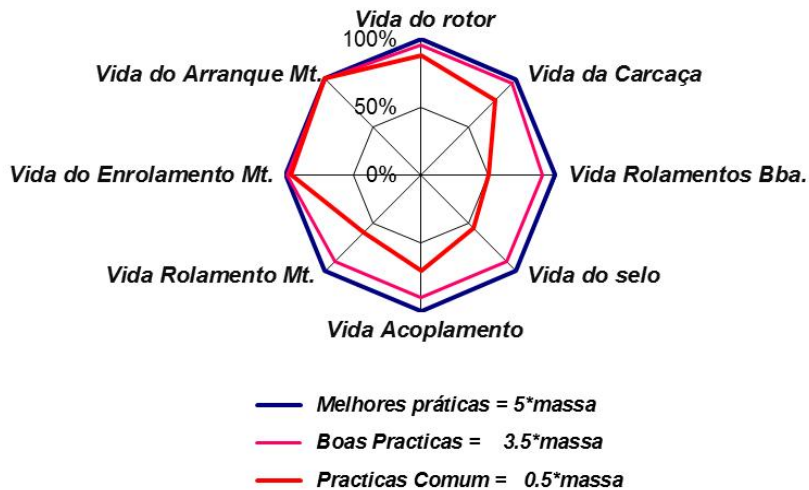
Vários fatores que afetam a confiabilidade das bombas foram considerados e classificados sempre de três formas:

- Melhores Práticas
- Boas Práticas
- Prática Comum

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

Dessa forma foi classificado três parâmetros comumente encontrado em instalações industriais.

Figura 3.3.8 Efeito da base de fundação na vida dos componentes.



Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

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.

### 3.3.2.2 Alinhamento

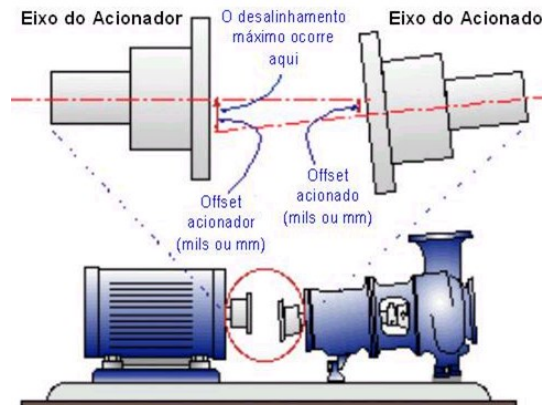
Em termos bem práticos, o desalinhamento de eixos ocorre quando as linhas de centro dos eixos de rotação de duas (ou mais) máquinas não se apresentam em linha.

Para correção é necessário a inserção de calços calibrados nos pés do motor com medidas bastante específicas para compensar precisamente o desalinhamento.

Existe inclusive norma que limitam a quantidade e altura dos calços calibrados que podem ser aplicados.

A Figura 3.3.9 apresenta os tipos de desalinhamento possíveis na montagem das bombas.

Figura 3.3.9 Condição típica de desalinhamento



Fonte: Adaptado (BLOCH e BUDRIS, 2010).

Existem inúmeras técnicas e ferramentas para o alinhamento entre eixos, sendo que nos dias de hoje o alinhamento a laser é o mais utilizado nas indústrias. No Quadro 2, é apresentado as tolerâncias máximas permitidas de desalinhamento angular e paralelo.

Quadro 1 Tolerâncias 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

Fonte: (SULZER, 2015).

Abaixo as principais consequências geradas pela falta de alinhamento:

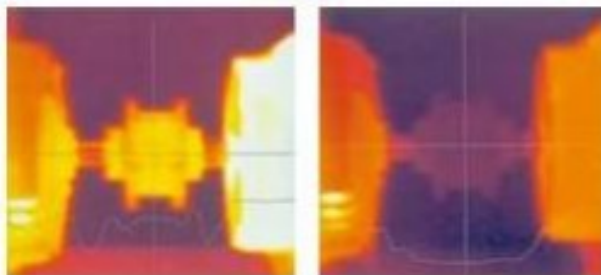
- Aumento dos níveis de vibração, o que acarreta vários outros problemas;
- Aquecimento e desgaste excessivo dos mancais;

- 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 ocasionado pelo desalinhamento.

**Figura 3.3.10** é possível verificar o elevado aquecimento ocasionado pelo desalinhamento.

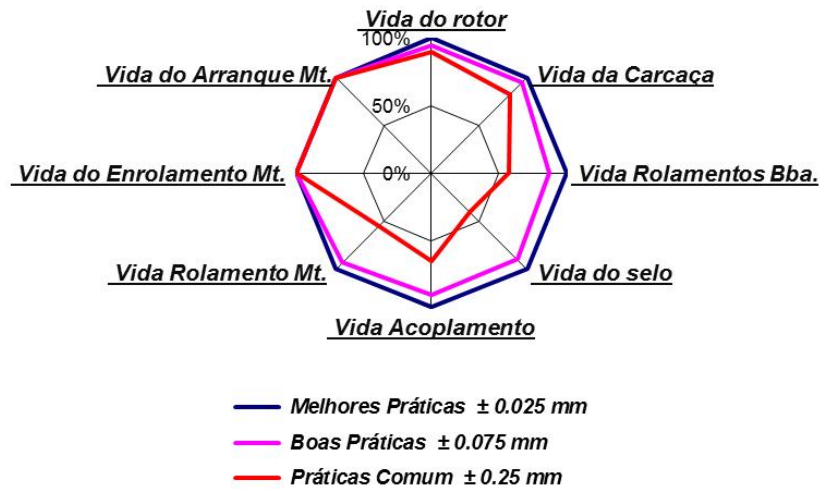
Figura 3.3.10 Análise Termográfica



Fonte: (ANGELO, 2016).

Conforme é possível observar na Figura 3.3.11, a vida do selo mecânico e rolamentos são os componentes mais prejudicados pelo desalinhamento entre eixos.

Figura 3.3.11 Efeitos do desalinhamento na Vida dos Componentes

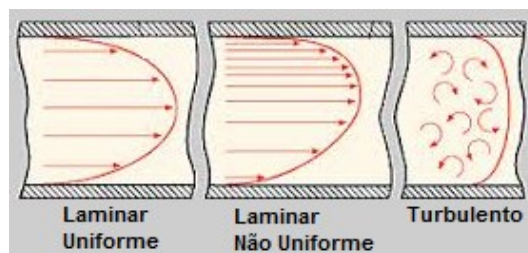


Fonte: Adaptado de (BARRINGER, 1997)

### 3.3.2.3 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 3.3.12.

Figura 3.3.12 Regime de fluxo

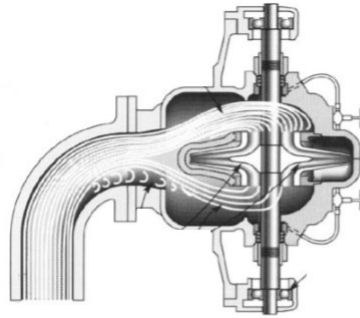


Fonte: (ANGELO, 2016)

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 3.3.13 apresenta os possíveis distúrbios causados na sucção de uma bomba em função de uma curva instalada imediatamente ao flange de sucção.

Figura 3.3.13 Influência hidráulica na sucção da bomba



Fonte: (BLOCH e BUDRIS, 2010)

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

As velocidades podem ser incrementadas no flange de sucção da bomba por meio de um redutor gradual.

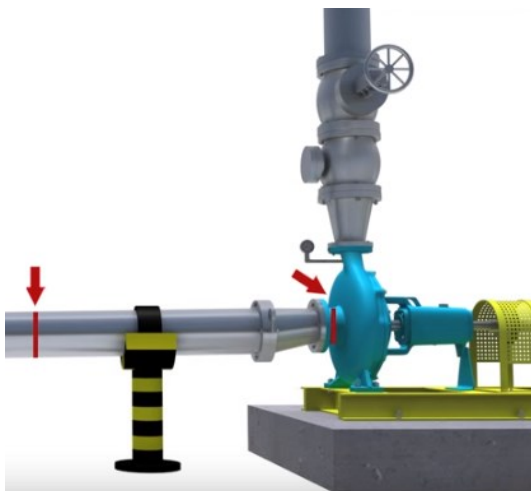
Redutores excêntricos geralmente devem ser instalados com o lado plano horizontal para cima e a parte inclinada para baixo a fim de evitar a formação de uma bolsa de ar.

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

O diâmetro nominal do flange de sucção da bomba não determina obrigatoriamente 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 3.3.14.

Figura 3.3.14 Diâmetro da tubulação de sucção

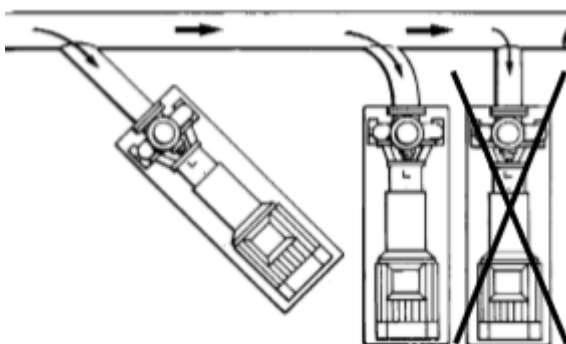


Fonte: (ANGELO, 2016).

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 3.3.15 ilustra a melhor maneira para instalação de bombas em uma única tubulação de sucção.

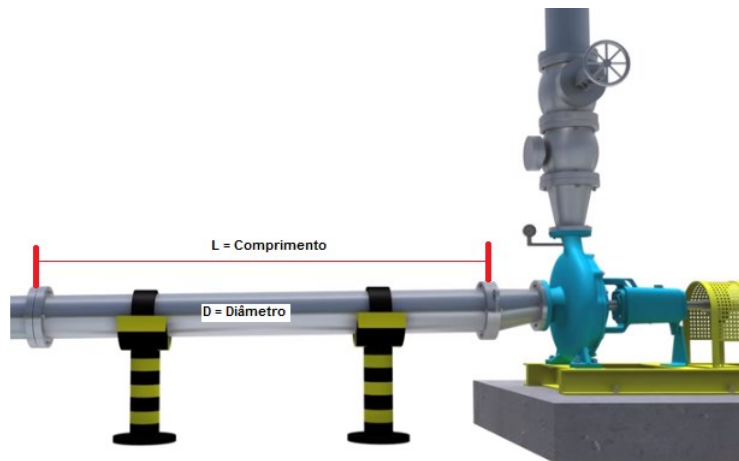
Figura 3.3.15 Bombas em uma única tubulação



Fonte: (SULZER, 2015).

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. Conforme ilustrado na **Figura 3.3.14**, alguns fabricantes recomendam que esse comprimento ( $L$ ) seja em torno de 5 a 10 vezes o diâmetro ( $D$ ) da tubulação.

Figura 3.3.16 Comprimento reto da tubulação de sucção



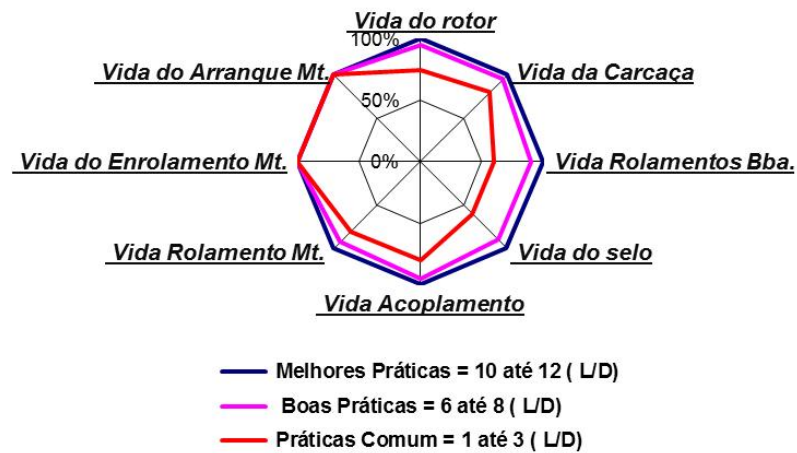
Fonte: (ANGELO, 2016).

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 perdas de carga. Conforme apresentado na

Figura **3.3.17**, novamente os rolamentos e selo mecânico são os principais componentes prejudicados.



Figura 3.3.17 Efeitos da tubulação na vida dos componentes



Fonte: Adaptado de (BARRINGER, 1997).

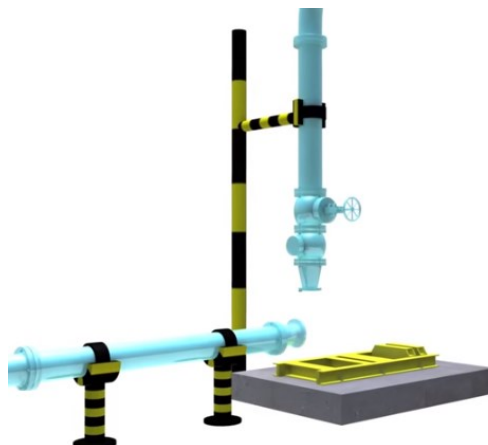
Quanto à tubulação de recalque, é necessária a instalação de uma válvula para regulagem da vazão e pressão de bombeamento. Também é sempre aconselhável instalar uma válvula de retenção entre a saída da bomba e a válvula de controle, quando o comprimento da tubulação de recalque for relativamente grande 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 conexão deverá ser feita por redução concêntrica.

#### 3.3.2.4 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 3.3.18.

No caso de fluido muito quente também é necessário considerar as influências na tubulação por dilatação térmica.

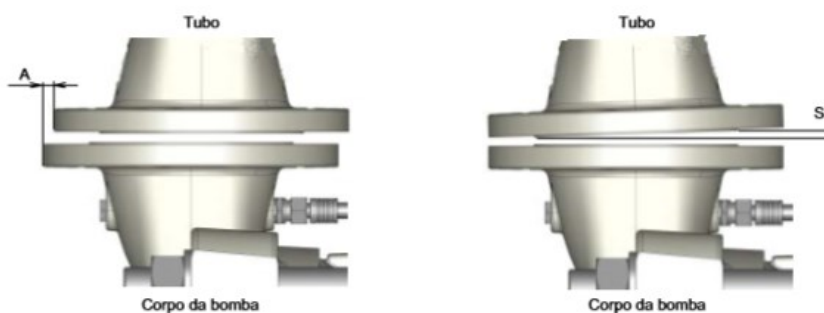
Figura 3.3.18 Tubulação suportada



Fonte: (ANGELO, 2016)

Os desalinhamentos na tubulação podem ocorrer basicamente forma radial e angular conforme ilustrado na Figura 3.3.19.

Figura 3.3.19 Desalinhamento radial e angular



Fonte: (SULZER, 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 3.

Quadro 2 Tolerâncias permitidas de desalinhamento na tubulação

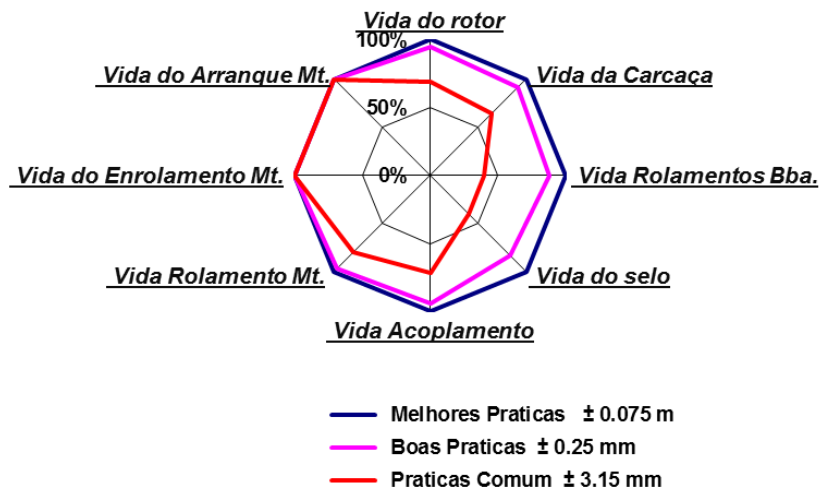
<b>Diâmetro Nominal do Flange</b>	<b>≤ DN 200</b>	<b>≥ DN 200</b>
<b>Desalinhamento Radial</b>	0,5 mm	0,5 mm
<b>Desalinhamento Angular</b>	0,2 mm	0,4 mm

Fonte: (SULZER, 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.

A Figura 3.3.20, apresenta os componentes mais afetados pelos esforços causados pelo desalinhamento e esforços causados pelas tubulações.

Figura 3.3.20 Efeitos dos esforços da tubulação na vida dos componentes



Fonte: Adaptado de (BARRINGER, 1997).

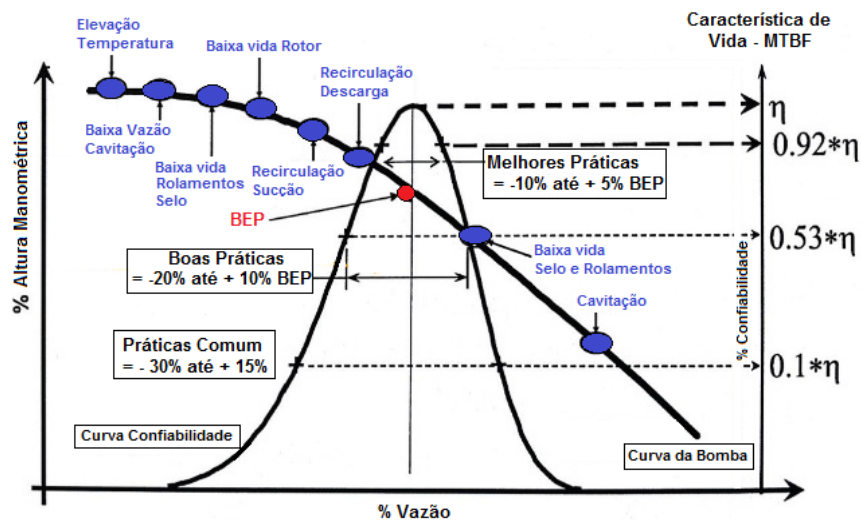
Deve se prever juntas de expansão sempre que o líquido bombeado estiver sujeito a altas variações de temperatura.

### 3.3.2.5 Melhor Ponto de Eficiência (BEP)

Em termos básicos, BEP identifica o ponto de funcionamento ou a área ao longo da curva de desempenho da bomba, onde a maior eficiência é obtida para diâmetro do impulsor.

Conforme apresentado na Figura 3.3.21 os parâmetros de posição Eta ( $\eta$ ) apresentam distorções significativas em relação ao MTBF.

Figura 3.3.21 Sintomas e efeito na confiabilidade causado pelo BEP

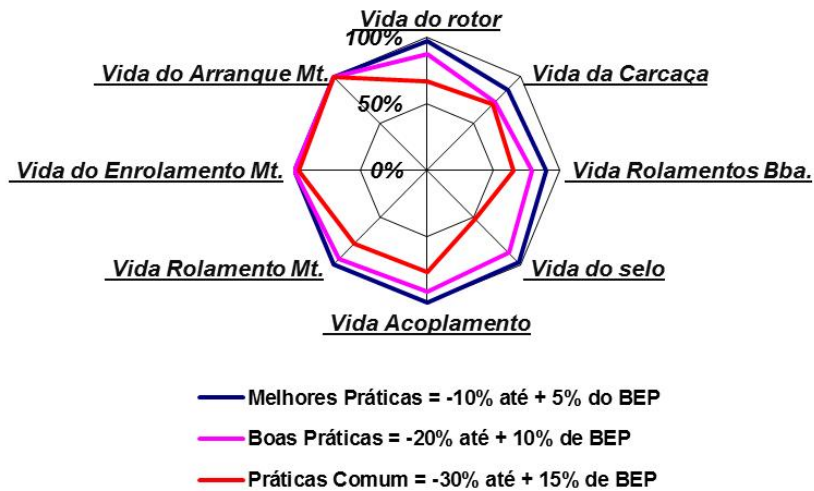


Fonte: Adaptado (BLOCH e BUDRIS, 2010).

À medida que o ponto de funcionamento de uma bomba se afasta do ponto do BEP, um desequilíbrio de pressão ocorre no interior da bomba, o equipamento perde eficiência, desperdiça energia e apresenta diversos sintomas.

Quanto mais energia é desperdiçada, mais aumentam a intensidade das forças destrutivas de modo que a confiabilidade é reduzida conforme Figura 3.3.22.

Figura 3.3.22 Efeitos do BEP na Vida dos Componentes



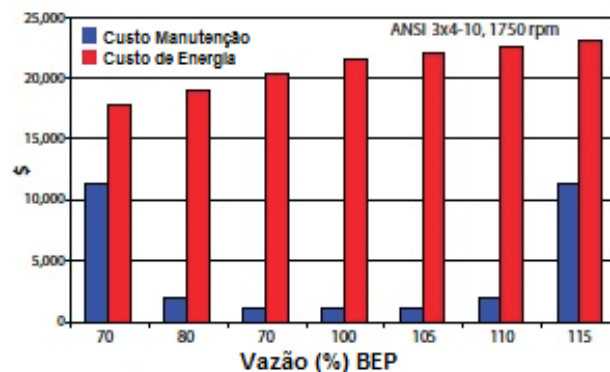
Fonte: Adaptado de (BARRINGER, 1997).

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.

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

Na Figura 3.3.23, apresenta um elevado custo de manutenção à medida que o ponto de operação se afasta do BEP.

Figura 3.3.23 Custo anual de Operação em função do BEP



Fonte: Adaptado (BLOCH e BUDRIS, 2010)

Existem diversos métodos para controle de Vazão das bombas centrífugas.

De forma prática podemos verificar se considerarmos que para determinado processo industrial apenas 50% da vazão é necessária considerando uma hora de operação, as opções seriam:

- A. Recircular 50% do fluxo, com custo de energia de 100% mantendo o ponto de operação próximo do BEP.
- B. Reduzir a vazão através de restrição da válvula, com custo de energia aproximado de 70% e afastando o ponto de operação do BEP.
- C. Manter o equipamento funcionando somente por 50% do tempo, com custo de energia de 50% mantendo o ponto de operação próximo do BEP
- D. 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 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.

### 3.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPITULO

Nesse capítulo foi apresentado as definições e conceitos básicos da engenharia de confiabilidade, além de sua aplicação para bombas centrífugas destacando os efeitos causados na confiabilidade pelas condições mais comuns de instalação e uso desses equipamentos.

No próximo capítulo será apresentado a planilha de cálculo e parâmetros técnicos e econômicos que serão objeto desse estudo e simulado através do método de Monte Carlo considerando as principais características apresentadas nos capítulos anteriores.

## 4 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO APLICADO AO LCC

Este capítulo apresenta a planilha de cálculo do qual é objeto de estudo, e realizará as simulações de Monte Carlo dentro dos principais conceitos de LCC e associados a engenharia de confiabilidade aplicado para bombas centrífugas

### 4.1 PARAMETROS DE SIMULAÇÃO

Para simulação será considera uma bomba padrão ISO 2858 com característica construtiva de 200-150-250.

O que significa dizer 200 mm o diâmetro do bocal de sucção, 150 mm o bocal de descarga, com diâmetro do rotor de 250 mm e potência instalada 150 KW em 2 Polos.

Na

#### Figura 4.1.1 Parâmetros de confiabilidade para simulação

Figura 4.1.1 segue a interface da planilha de cálculo utilizado para simulação.

Figura 4.1.1 Parâmetros de confiabilidade para simulação

SIMULADOR DE CONFIABILIDADE EM FUNÇÃO DO PADRÃO DE EQUIPAMENTO, CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO / USO E ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO														
1º PASSO: Selecione o padrão de Bomba a ser analisada e o seu padrão inerente de Confiabilidade de seus componentes		Melhores Práticas de Instalação e uso.		Praticas comum de Instalação e uso		2º PASSO: Selecione do lado esquerdo o modelo Pratico de Instalação e Uso a ser considerado na Simulação		3º PASSO: Selecione do lado direito o Quantidade de Bombas instaladas para Análise da Margem de Produção Bruta Perdida		01(x) Bomba Margem Produção Bruta Perdida		4º PASSO: Selecione abaixo qual estratégia de manutenção a ser considerado na Simulação		
Boas Práticas de Instalação e uso		Práticas de Instalação e uso do Usuário		Melhores Páticas de Instalação e Uso		Efeitos das práticas de Instalação e Uso na vida dos componentes		02(x) Bombas		Boas Práticas		Boas Práticas Substitui itens relacionados		
Substitui apenas o Item danificado		Definições usuário Substitui itens definidos												
Confiabilidade Inerente dos componentes		Bomba Centrífuga 200-150-250 (ISO 2858) - 150 Kw				Multiplicador		Efeitos das práticas de Instalação e Uso na vida dos componentes		02(x) Bombas		Boas Práticas		
Padrão Bomba	API	beta	eta	MTBF (anos) = $\eta \cdot \Gamma(1+1/\beta)$	Mult. de vida (x) eta práticas	beta	eta	MTBF (anos) = $\eta \cdot \Gamma(1+1/\beta)$						
	Fator de Forma ( $\beta$ )	Fator de Localização ( $\sigma$ ) (hrs)				Fator de Forma ( $\beta$ )	Fator de Localização ( $\sigma$ ) (hrs)							
API	Rotor	2,5	400.000	40,51	0,9726	2,5	389.045	39,40						
ANSI	Mancal	1,3	400.000	42,17	0,8547	1,3	341.882	36,05						
	Rolamentos Ebas	1,3	400.000	42,17	0,9712	1,3	388.476	40,96						
ANSI +	Selos	1,4	400.000	41,62	0,9677	1,4	387.090	40,27						
	Eixo	1,2	400.000	42,95	0,9712	1,2	388.476	41,71						
Usuário	Acoplamento	2	300.000	30,35	0,9801	2,0	294.030	29,75						
	Rolamentos MT	1,3	150.000	15,81	1,0000	1,3	150.000	15,81						
Dados de Vida	Enrolamento MT	1	150.000	17,12	1,0000	1,0	150.000	17,12						
	Rotor do motor	1	300.000	34,25	1,0000	1,0	300.000	34,25						
Dados de Vida	Partida do Motor	1,2	300.000	32,21	1,0000	1,2	300.000	32,21						
				<b>2,99</b>	<b>Anos</b>	<b>2%</b>	<b>Percentual</b>	<b>2,93</b>	<b>Anos</b>					
				<b>26.209</b>	<b>Horas</b>	<b>582</b>	<b>horas</b>	<b>25.627</b>	<b>Horas</b>					
						<b><math>\Delta =</math> Perdas</b>								

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

Na sequência será detalhado passo a passo as configurações e possíveis parâmetros a ser considerado e simulado nesse trabalho.

#### 4.1.1 Norma construtiva e confiabilidade inerente – 1º passo

A confiabilidade inerente (ou intrínseca) de um equipamento é uma característica que normalmente é definida na concepção de seu projeto e deve ter sempre que possível sua capacidade teórica comprovada em ambiente de laboratório.

Conforme verificado no capítulo anterior, o padrão construtivo do equipamento é fator significativo de confiabilidade e inerente ao equipamento que deve ser levado em consideração em análises de LCC de uma bomba centrífuga.

Para fins de simulação e desenvolvimento desse trabalho, foi considerado três tipos de bombas e seus respectivos parâmetros de confiabilidade. Entre os tipos considerados o ANSI, ANSI Reforçada (+) e API conforme mostrado na Figura 4.1.2.

Figura 4.1.2 Parâmetros de confiabilidade para simulação

Confiabilidade Inerente dos componentes para simulação								
ANSI	beta	eta	ANSI +	beta	eta	API	beta	eta
	Fator de Forma ( $\beta$ )	Fator de Localização ( $\sigma$ ) (hrs)		Fator de Forma ( $\beta$ )	Fator de Localização ( $\sigma$ ) (hrs)		Fator de Forma ( $\beta$ )	Fator de Localização ( $\sigma$ ) (hrs)
Rotor	2,5	300.000	Rotor	2,5	300.000	Rotor	2,5	400.000
Mancal	1,3	300.000	Mancal	1,3	300.000	Mancal	1,3	400.000
Rolamentos Bbas	1,3	100.000	Rolamentos Bbas	1,3	200.000	Rolamentos Bbas	1,3	400.000
Selos	1,4	100.000	Selos	1,4	200.000	Selos	1,4	400.000
Eixo	1,2	300.000	Eixo	1,2	300.000	Eixo	1,2	400.000
Acoplamento	2	100.000	Acoplamento	2	100.000	Acoplamento	2	300.000
Rolamentos MT	1,3	150.000	Rolamentos MT	1,3	150.000	Rolamentos MT	1,3	150.000
Enrolamento MT	1	150.000	Enrolamento MT	1	150.000	Enrolamento MT	1	150.000
Rotor do motor	1	300.000	Rotor do motor	1	300.000	Rotor do motor	1	300.000
Partida do Motor	1,2	300.000	Partida do Motor	1,2	300.000	Partida do Motor	1,2	300.000

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

Importante observar que o mais alto grau construtivo das bombas, aumenta relativamente a vida nos componentes considerados. Sendo que a vida inerente dos componentes da bomba é descrita usando parâmetros estatísticos do modelo Weibull.



#### 4.1.2 Influência das práticas de Instalação e uso – 2º passo

Dado que estamos tratando de uma análise LCC, torna-se necessário a consciência das relações que permeiam ou distorcem tecnicamente e/ou economicamente os resultados do estudo desde a concepção do projeto.

##### 4.1.2.1 Confiabilidade

Os valores característicos da Weibull para a confiabilidade inerente podem ser obtidos do fabricante do equipamento, manuais, sites ou dimensionados da experiência operacional. Conforme apresentado no capítulo anterior, as condições de uso e instalação dos equipamentos devem ser amplamente observadas, dado que exercem distorções significativas as características inerentes de confiabilidade.

Na análise Weibull dos componentes, o fator de forma beta ( $\beta$ ) infere o modo de falha, ou seja,  $\beta < 1$  considerado como mortalidade infantil,  $\beta = 1$  é considerado como taxa de falha constante, e  $\beta > 1$  é falha ocasionado por envelhecimento e/ou desgaste. Já “eta” ( $\sigma$ ) é considerado um parâmetro de localização e descreve a característica de idade a falha ou fracasso.

Dessa forma para fins de simulação será considerado três cenários e suas respectivas distorções causadas em relação a confiabilidade inerente do equipamento. Onde os multiplicadores apresentados são aplicados diretamente na equação, distorcendo os parâmetros de localização “eta” ( $\sigma$ ), diminuindo assim a vida inerente dos componentes. Vale destacar que os valores apresentados a seguir foram obtidos com base em uma pesquisa e julgamento de experiência de muitos engenheiros nos EUA por (BARRINGER, 1997) que avaliou os efeitos das práticas de instalação, uso e os respectivos custos envolvidos para fins de LCC.

##### 4.1.2.1.1 Melhores Práticas de Instalação e Uso

Na Figura 4.1.3 é possível observar as condições consideradas ideais causando uma baixa distorção em relação aos dados de confiabilidade inerente do equipamento.

Figura 4.1.3 Melhores Práticas de Instalação e Uso

		Curva da Bomba % do BEP	L/D trecho reto de tubulação	Alinhamento entre eixos	Desalinhamento Tubulação	Balaceamento Rotacional (3500 RPM) ISO 1940	Base de Fundação	Qualidade do Graute
Melhores Práticas de Instalação e Uso	Multiplicador eta ( $\sigma$ )	+ 5% à -10% do BEP	L/D = 10 a 12 (Compr. X Diam)	$\pm 0,02$ mm	$\pm 0,5$ mm	Suave em 7 gmm/kg	5 vezes massa do equipamento	Epóxi Monolítico e Adesivo
Rotor	0,9726	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Mancal	0,8547	86%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Rolamentos Bbas	0,8719	98%	100%	100%	100%	99%	100%	100%
Selos	0,9533	98%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
Eixo	0,8719	98%	100%	100%	100%	99%	100%	100%
Acoplamento	0,9801	99%	100%	99%	100%	100%	100%	100%
Rolamentos MT	1,0000	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Enrolamento MT	1,0000	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Rotor do motor	1,0000	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Partida do Motor	1,0000	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

#### 4.1.2.1.2 Boas Práticas de Instalação e Uso

Na Figura 4.1.4 é possível observar boas condições de instalação e uso já causando alguma distorção aos dados de confiabilidade inerente do equipamento.

Figura 4.1.4 Boas Práticas de Instalação e Uso

		Curva da Bomba % do BEP	L/D trecho reto de tubulação	Alinhamento entre eixos	Desalinhamento Tubulação	Balaceamento Rotacional (3500 RPM) ISO 1940	Base de Fundação	Qualidade do Graute
Boas Práticas de Instalação e Uso	Multiplicador eta ( $\sigma$ )	+ 10% à -20% do BEP	L/D = 6 a 12 (Compr. X Diam)	$\pm 0,05$ mm	$\pm 1$ mm	Bom em 18 gmm/kg	3,5 vezes a massa do equipamento	Ligeiramente poroso mas adesivo
Rotor	0,6583	88%	95%	95%	94%	95%	95%	98%
Mancal	0,5163	73%	95%	95%	92%	95%	95%	95%
Rolamentos Bbas	0,3950	79%	90%	88%	88%	90%	90%	90%
Selos	0,4314	88%	90%	90%	84%	90%	90%	90%
Eixo	0,3950	79%	90%	88%	88%	90%	90%	90%
Acoplamento	0,5705	92%	95%	90%	94%	95%	90%	91%
Rolamentos MT	0,6036	94%	93%	94%	97%	95%	90%	90%
Enrolamento MT	0,9776	100%	100%	100%	100%	100%	99%	99%
Rotor do motor	0,6036	94%	93%	94%	97%	95%	90%	90%
Partida do Motor	1,0000	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

#### 4.1.2.1.3 Práticas comum de Instalação e Uso

Na Figura 4.1.5 é possível observar as práticas mais comum de instalação e uso, com baixa confiabilidade em detrimento ao baixo custo envolvido de instalação e uso.

Figura 4.1.5 Práticas comum de Instalação e Uso

Práticas comuns de Instalação e Uso	Multiplicador eta ( $\sigma$ )	Curva da Bomba % do BEP	L/D trecho reto de tubulação	Alinhamento entre eixos	Desalinhamento Tubulação	Balaceamento Rotacional (3500 RPM)	Base de Fundação	Qualidade do Graute
		+15% á -30% do BEP	L/D = 1 a 3 (Compr. X Diam)	$\pm 0,10$ mm	$\pm 2$ mm	Ruim em 25 gmm/kg	0,5 vezes a massa de equipamento	Adesão cimentada e baixa
Rotor	0,1949	68%	75%	90%	69%	81%	88%	88%
Mancal	0,1438	70%	80%	83%	64%	79%	78%	80%
Rolamentos Bbas	0,0151	65%	60%	58%	40%	61%	50%	55%
Selos	0,0095	51%	60%	40%	40%	64%	55%	55%
Eixo	0,0151	65%	60%	58%	40%	61%	50%	55%
Acoplamento	0,1149	76%	80%	65%	71%	78%	70%	75%
Rolamentos MT	0,0737	78%	80%	55%	80%	75%	60%	60%
Enrolamento MT	0,8625	97%	100%	100%	100%	95%	96%	98%
Rotor do motor	0,0737	78%	80%	55%	80%	75%	60%	60%
Partida do Motor	1,0000	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

#### 4.1.2.2 Base de custo

Necessário avaliar detalhadamente desde concepção do projeto o investimento inicial, que se relaciona com nível de especificação e qualidade dos equipamentos, instalação e condições de uso. Na Figura 4.1.6 é possível observar a base de custos considerados para simulações que terão atuação durante todo o ciclo de vida do projeto.

Figura 4.1.6 Principais custos relacionados

	ANSI			ANSI +			API		
	Práticas Comum de Instalação e Uso	Boas Práticas de Instalação e Uso	Melhores Práticas de Instalação e Uso	Práticas Comum de Instalação e Uso	Boas Práticas de Instalação e Uso	Melhores Práticas de Instalação e Uso	Práticas Comum de Instalação e Uso	Boas Práticas de Instalação e Uso	Melhores Práticas de Instalação e Uso
Custo total de aquisição do equipamento	R\$ 32.000,00	R\$ 32.000,00	R\$ 32.000,00	R\$ 52.000,00	R\$ 52.000,00	R\$ 52.000,00	R\$ 65.000,00	R\$ 65.000,00	R\$ 65.000,00
Balaceamento componentes Rotativos	R\$ 100,00	R\$ 137,00	R\$ 167,00	R\$ 125,00	R\$ 171,00	R\$ 209,00	R\$ 200,00	R\$ 274,00	R\$ 334,00
Montagem Bba no sistema de tubulações	R\$ 150,00	R\$ 180,00	R\$ 225,00	R\$ 175,00	R\$ 210,00	R\$ 263,00	R\$ 300,00	R\$ 360,00	R\$ 450,00
Custo do concreto e base Fundação	R\$ 1.800,00	R\$ 3.376,00	R\$ 4.823,00	R\$ 1.950,00	R\$ 3.601,00	R\$ 5.144,00	R\$ 2.200,00	R\$ 4.501,00	R\$ 6.430,00
Montagem da bomba na Fundação	R\$ 400,00	R\$ 600,00	R\$ 800,00	R\$ 500,00	R\$ 700,00	R\$ 1.000,00	R\$ 600,00	R\$ 800,00	R\$ 1.200,00
Grauteamento final da base de fundação	R\$ 250,00	R\$ 500,00	R\$ 750,00	R\$ 250,00	R\$ 500,00	R\$ 750,00	R\$ 250,00	R\$ 500,00	R\$ 750,00
Custo Total de Válvulas/Acessórios	R\$ 2.500,00	R\$ 3.000,00	R\$ 4.000,00	R\$ 3.500,00	R\$ 4.000,00	R\$ 4.500,00	R\$ 4.000,00	R\$ 5.000,00	R\$ 6.000,00
Relação (L/D) trecho reto de tubulação	R\$ 300,00	R\$ 450,00	R\$ 600,00	R\$ 300,00	R\$ 450,00	R\$ 600,00	R\$ 300,00	R\$ 450,00	R\$ 600,00
Montagem do sistema de tubulação	R\$ 1.000,00	R\$ 1.200,00	R\$ 1.500,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.200,00	R\$ 1.500,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.200,00	R\$ 1.500,00
Verificar e alinhar sistemas de tubulação	R\$ 1.000,00	R\$ 1.200,00	R\$ 1.500,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.200,00	R\$ 1.500,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.200,00	R\$ 1.500,00
Custo de materiais e Instalação Elétrica	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00
Custo de Instrumentação e controle	R\$ 500,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.500,00	R\$ 500,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.500,00	R\$ 500,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.500,00
Modificar o rotor para aproximação BEP	R\$ -	R\$ 1.000,00	R\$ 2.250,00	R\$ -	R\$ 1.000,00	R\$ 2.250,00	R\$ -	R\$ 1.000,00	R\$ 2.250,00
Custo do Motor por eficiência	R\$ 15.000,00	R\$ 22.000,00	R\$ 22.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 22.000,00	R\$ 22.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 22.000,00	R\$ 22.000,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 70.000,00</b>	<b>R\$ 81.643,00</b>	<b>R\$ 87.115,00</b>	<b>R\$ 91.300,00</b>	<b>R\$ 103.032,00</b>	<b>R\$ 108.216,00</b>	<b>R\$ 105.350,00</b>	<b>R\$ 118.285,00</b>	<b>R\$ 124.514,00</b>

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

Conforme apresentado em capítulos anteriores, o custo relacionado ao consumo de energia elétrica deve ser considerado o grande vilão de qualquer análise LCC aplicado a bombas centrífugas.

Portanto é necessário muita atenção e assertividade quanto as reais demandas operacionais e mais ainda quanto a eficiência do conjunto moto bomba selecionado.

Não sendo necessário um LCC complexo ou tamanho detalhado para uma correta distinção e tomada de decisão nesse quesito. Um simples cálculo de VPL terá significativa contribuição.

Na Figura 4.1.7 é possível verificar as condições e valores considerados para simulação.

Figura 4.1.7 Condições operacionais e custos elétricos relacionados

	Práticas comuns de Instalação e Uso	Boas Práticas de Instalação e Uso	Melhores Práticas de Instalação e Uso
Taxa de fluxo permitido abaixo do BEP (-%)	-30%	-20%	-10%
Taxa normal de fluxo planejada no BEP (%)	100%	100%	100%
Taxa de fluxo permitido acima do BEP (+%)	15%	10%	5%
Eficiência na menor taxa permitido BEP (%)	54%	57%	62%
Eficiência na melhor taxa permitido BEP (%)	68%	71%	82%
Eficiência na maior taxa permitido BEP (%)	59%	60%	68%
Vazão na menor taxa permitido BEP (m³/h)	560	640	720
Vazão na melhor taxa permitido BEP (m³/h)	800	800	800
Vazão na maior taxa permitido BEP (m³/h)	920	880	840
Altura Man. na menor taxa permitido BEP (m)	48	45	42
Altura Man. na melhor taxa permitido BEP (m)	40	40	40
Altura Man. na maior taxa permitido BEP (m)	35	37	39
Densidade do fluido bombeado (kg/m³)	1000	1000	1000
Potência Cons. na menor taxa permitido BEP (kW)	135,6	137,7	132,9
Potência Cons. na melhor taxa permitido BEP (kW)	128,2	122,8	106,3
Potência Cons. na maior taxa permitido BEP (kW)	148,7	147,9	131,3
Potência do Motor instalado (kW)	150,0	150,0	150,0
Máxima eficiência do motor instalado (%)	90%	95%	95%
Custo por kilowatts/hora (R\$)	R\$ 0,32	R\$ 0,32	R\$ 0,32
Custo anual por kilowatts/hora (R\$)	R\$ 2.803,20	R\$ 2.803,20	R\$ 2.803,20
Custo total anual por kilowatts instalado (R\$)	R\$ 462.528,00	R\$ 438.184,42	R\$ 438.184,42
Taxa anual de regime de Operação - Tempo (%)	99%	99%	99%

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

#### 4.1.3 Redundância e perda de produção bruta – 3º passo

A configuração de dois ou mais equipamentos instalados em paralelo, ou redundantes tende a contribuir significativamente com os parâmetros de confiabilidade e disponibilidade de qualquer sistema.

Assegurando dessa forma prejuízos mínimos ocasionados pelo tempo de inatividade e perda de produção.

Em contrapartida nessa circunstância, naturalmente é necessário sempre levar em consideração na análise LCC todos os custos gerados e associados para esse outro equipamento desde sua aquisição, instalação até o descarte.

Dessa forma, para fins de simulação nesse trabalho temos a possibilidade de selecionar a quantidade de equipamento a ser considerado, seja operando de forma isolada ou mantendo um equipamento idêntico reserva para em caso de eventuais falhas amenizando significativamente o tempo de inatividade e contribuindo com os parâmetros de confiabilidade.

Na Figura 4.1.8 é possível verificar a como premissa as probabilidades de falhas consideradas e os custos por hora de produção bruta perdida por conta do tempo de ociosidade e/ou até o restabelecimento do sistema em eventos de falha.

Figura 4.1.8 Consequência das falhas

	01(x) Bomba	02(x) Bombas
Probabilidade de falha	1,00	0,01
Consequências se ocorrer falha R\$/H	R\$ 12.000,00	R\$ 12.000,00
Custo por hora de Inatividade - Risco	R\$ 12.000,00	R\$ 120,00

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

#### 4.1.4 Estratégias de manutenção – 4º passo

Nesse parâmetro duas estratégias de manutenção são possíveis de serem avaliadas independentemente do tipo de equipamento selecionado.

##### 4.1.4.1 Boas Práticas de Manutenção

A primeira estratégia, denominada como Boas Práticas de Manutenção, além de substituir o componente danificado, também troca outros componentes associados que não falharam no equipamento dado que o equipamento já está aberto para reparo.

Alguns autores afirmam que essa prática, eventualmente pode inserir novos modos de falhas no equipamento, mas apenas se mão de obra empregada não for devidamente qualificada.

Para definição dos itens que estão diretamente associados e/ou que sofrem pequenas avarias e/ou desgaste quando o componente principal falha, é necessário contar com a experiência dos profissionais ou especialista desse tipo de equipamento.

Para exemplificar, na Figura 4.1.9 é possível verificar que quando o rotor é substituído, os rolamentos da bomba e selo mecânico também são trocados.

Figura 4.1.9 Substituição de componentes associados

	Rotor	Mancal	Rolamentos Bbas	Selos	Eixo	Acoplamento	Rolamentos MT	Enrolamento MT	Rotor do motor	Partida do Motor
Rotor	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mancal	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Rolamentos Bbas	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Selos	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Eixo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Acoplamento	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Rolamentos MT	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Enrolamento MT	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Rotor do motor	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Partida do Motor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

Quando esses itens associados que ainda não falharam são substituídos preventivamente, e a vida restante do componente é desperdiçada em detrimento da redução do tempo inicial futuro, enquanto se aguarda as falhas.

Para fins de simulação, o entendimento deve ser que essa prática melhora a confiabilidade do equipamento e o tempo médio entre falhas, com um ligeiro incremento dos custos relacionados a mão de obra e materiais aplicados.

#### 4.1.4.2 Práticas comum de Manutenção

Intuitivamente pode ser considerado uma Prática Comum de Manutenção, a substituição apenas do componente que venha a ocasionar a falha ou perda de função do equipamento. Não sendo levado em consideração a fadiga ou estágio da vida útil dos demais componentes associados aquele que apresentou falhas, sendo os mesmos mantidos em suspensão.

Buscando dessa forma reduzir o dispêndio econômico relacionado ao custo adicionais do material aplicado, bem como o tempo gasto de intervenção e inatividade em detrimento aos riscos operacionais assumido. Na Figura 4.1.10 é possível observar como a planilha de cálculo interpreta essas informações.

Figura 4.1.10 Substituição apenas do componente danificado

	Rotor	Mancal	Rolamentos Bbas	Selos	Eixo	Acoplamento	Rolamentos MT	Enrolamento MT	Rotor do motor	Partida do Motor
Rotor	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mancal	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Rolamentos Bbas	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Selos	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Eixo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Acoplamento	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Rolamentos MT	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Enrolamento MT	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Rotor do motor	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Partida do Motor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

#### 4.1.4.3 Base de custo e tempo para intervenções de manutenção

Dado o tipo de equipamento selecionado, eventualmente podemos ter variação no tempo necessário de intervenção e substituição dos componentes, de acordo com o aumento do nível de especificação do equipamento Na Figura 4.1.11 é possível observar os valores considerados para realização da simulação

Figura 4.1.11 Duração das atividades de manutenção em horas

	Valores de decisão		
	0	1	0
	ANSI	ANSI +	API
Rotor	5	6	7
Mancal	5	6	8
Rolamentos Bbas	5	8	10
Selos	4	6	8
Eixo	5	6	8
Acoplamento	2	2	2
Rolamentos MT	6	7	8
Enrolamento MT	6	7	8
Rotor do motor	6	7	8
Partida do Motor	4	4	4
Montagem MT	6	6	6

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

Da mesma forma, os custos dos componentes também possuem base de custo diferente de empresa para empresa e ainda a depender do tipo de equipamento selecionado. Na Figura 4.1.12 é possível verificar a composição e os valores totais considerados para simulação.

Figura 4.1.12 Custo estimado para intervenções de manutenção

	ANSI				ANSI +				API			
	Item	Logística	Oficina	Total	Item	Logística	Oficina	Total	Item	Logística	Oficina	Total
Rotor	R\$ 12.800	R\$ 750	R\$ 1.750	R\$ 15.300	R\$ 17.600	R\$ 750	R\$ 2.400	R\$ 20.750	R\$ 20.000	R\$ 750	R\$ 3.500	R\$ 24.250
Mancal	R\$ 4.500	R\$ 500	R\$ 1.750	R\$ 6.750	R\$ 7.000	R\$ 500	R\$ 2.000	R\$ 9.500	R\$ 9.000	R\$ 500	R\$ 4.000	R\$ 13.500
Rolamentos Bbas	R\$ 1.200	R\$ 75	R\$ 1.750	R\$ 3.025	R\$ 1.750	R\$ 75	R\$ 2.000	R\$ 3.825	R\$ 2.000	R\$ 75	R\$ 5.000	R\$ 7.075
Selos	R\$ 6.000	R\$ 300	R\$ 1.400	R\$ 7.700	R\$ 10.000	R\$ 300	R\$ 1.600	R\$ 11.900	R\$ 12.500	R\$ 300	R\$ 4.000	R\$ 16.800
Eixo	R\$ 3.500	R\$ 300	R\$ 1.750	R\$ 5.550	R\$ 5.500	R\$ 300	R\$ 2.000	R\$ 7.800	R\$ 9.000	R\$ 300	R\$ 4.000	R\$ 13.300
Acoplamento	R\$ 1.600	R\$ 300	R\$ 700	R\$ 2.600	R\$ 3.800	R\$ 300	R\$ 800	R\$ 4.900	R\$ 6.000	R\$ 300	R\$ 1.000	R\$ 7.300
Rolamentos MT	R\$ 1.200	R\$ 75	R\$ 2.100	R\$ 3.375	R\$ 1.200	R\$ 75	R\$ 2.400	R\$ 3.675	R\$ 1.200	R\$ 75	R\$ 4.000	R\$ 5.275
Enrolamento MT	R\$ 6.000	R\$ 200	R\$ 2.100	R\$ 8.300	R\$ 6.000	R\$ 200	R\$ 2.400	R\$ 8.600	R\$ 6.000	R\$ 200	R\$ 4.000	R\$ 10.200
Rotor do motor	R\$ 8.000	R\$ 200	R\$ 2.100	R\$ 10.300	R\$ 8.000	R\$ 200	R\$ 2.400	R\$ 10.600	R\$ 8.000	R\$ 200	R\$ 4.000	R\$ 12.200
Partida do Motor	R\$ 2.000	R\$ 200	R\$ 1.400	R\$ 3.600	R\$ 2.000	R\$ 200	R\$ 1.600	R\$ 3.800	R\$ 2.000	R\$ 200	R\$ 2.000	R\$ 4.200
Montagem MT	R\$ 10.000	R\$ 200	R\$ 2.100	R\$ 12.300	R\$ 10.000	R\$ 200	R\$ 2.400	R\$ 12.600	R\$ 10.000	R\$ 200	R\$ 3.000	R\$ 13.200

Fonte: Adaptado (BARRINGER, 1997).

#### 4.1.4.4 Análise de Viabilidade Econômica

Para realização da simulação e análise de viabilidade econômica será utilizado o método de Valor Presente Líquido também conhecido como VPL. O VPL é uma fórmula econômico-financeira capaz de determinar o valor presente para pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros adequada, menos o custo do investimento inicial. Dessa maneira, o valor presente líquido (VPL) de um projeto de investimento pode ser definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa ao projeto associado.

## 4.2 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi apresentado a planilha de cálculo e os principais parâmetros técnicos e econômicos que serão objeto desse estudo e permitirão gerar o LCC através da simulação pelo método de Monte Carlo.

No próximo capítulo será apresentado os resultados da simulação considerando diversos cenários com variação das principais características apresentado nos capítulos anteriores.



## 5 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO APLICADO A ANÁLISE DE LCC

Para todas as análises, serão realizadas 500 interações da Simulação de Monte Carlo, e o equipamento considerado é uma bomba centrífuga 200-150-250 (ISO 2858) com motor instalado de potência 150 kW em 2 Polos (3500 RPM), com uma taxa de utilização de 8700 horas ano, com tempo de projeto máximo de 20 anos e taxa de juros descontada de 12% a.a. para composição de inflação e retorno de capital investido.

Para todas as simulações, os 03 modelos de equipamentos serão avaliados em todas as “Práticas de Instalação e Uso”.

As principais métricas a ser considerada para conclusão da análise serão:

- VPL – Valor Presente Líquido
- $R(t)$  – Confiabilidade média anual do sistema
- $A(t)$  – Disponibilidade média anual do sistema
- Man. (Hrs) – Tempo médio anual de horas em manutenção
- $R(t) * A(t)$  - Taxa de Efetividade média anual do sistema

### 5.1 ANALISE #1

Para primeira análise, além dos 03 modelos de equipamentos que serão avaliados em todas as “Práticas de Instalação e Uso” os seguintes parâmetros serão considerados:

- “02(x) Bombas” (instaladas em paralelo, sendo uma reserva)
- “Boas Práticas de Manutenção” (Substitui também itens relacionados).

Na

Figura **5.1.1** será possível verificar os resultados destacado em amarelo para as melhores condições e vermelho as piores condições observadas.

Figura 5.1.1 Resultados da Análise 1#

Práticas de Instalação e Uso	Bomba ANSI				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)
Melhores	-R\$ 1.870.856,89	89,72%	100,00%	1,78	89,72%
Boas	-R\$ 2.082.844,76	75,65%	100,00%	3,03	75,65%
Comuns	-R\$ 3.402.556,72	0,00%	100,00%	54,93	0,00%
	Bomba ANSI Extendida				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)
Melhores	-R\$ 1.911.401,48	91,50%	100,00%	1,91	91,50%
Boas	-R\$ 2.124.249,65	79,43%	100,00%	3,35	79,43%
Comuns	-R\$ 3.331.867,56	0,04%	100,00%	50,37	0,04%
	Bomba API				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)
Melhores	-R\$ 1.936.210,55	95,14%	100,00%	1,85	95,14%
Boas	-R\$ 2.139.125,52	88,54%	100,00%	3,06	88,54%
Comuns	-R\$ 3.105.458,24	1,04%	100,00%	41,40	1,04%

Fonte: Autor.

Embora com uma menor confiabilidade, aparentemente nessa primeira simulação a bomba modelo “ANSI” utilizando as “Melhores Práticas de Instalação e Uso” pode ser considerada a melhor opção. Dado principalmente a geração de menor VPL, o menor tempo de manutenção e absoluta disponibilidade.

Muito da disponibilidade pelo fato de possuir dois equipamentos instalados em paralelo e mantendo sempre um como reserva.

## 5.2 ANALISE #2

Para segunda análise, além dos 03 modelos de equipamentos que serão avaliados em todas as “Práticas de Instalação & Uso”, os seguintes parâmetros serão considerados:

- “02(x) Bombas” (instaladas em paralelo, sendo uma reserva)
- “Práticas Comum de Manutenção” (Substitui apenas itens danificados).

Na Figura 5.2.1 será possível verificar os resultados destacado em amarelo para as melhores condições e vermelho as piores condições observadas.

Figura 5.2.1 Resultados da Análise 2#

Práticas de Instalação e Uso	Bomba ANSI				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)
Melhores	-R\$ 1.867.462,20	87,16%	100,00%	1,97	87,16%
Boas	-R\$ 2.071.663,62	69,39%	100,00%	3,54	69,39%
Comuns	-R\$ 3.249.157,87	0,00%	100,00%	61,91	0,00%
Práticas de Instalação e Uso	Bomba ANSI Extendida				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)
Melhores	-R\$ 1.904.411,30	89,47%	100,00%	2,16	89,47%
Boas	-R\$ 2.106.780,33	75,01%	100,00%	3,78	75,01%
Comuns	-R\$ 3.139.206,43	0,01%	100,00%	56,02	0,01%
Práticas de Instalação e Uso	Bomba API				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)
Melhores	-R\$ 1.928.778,84	94,62%	100,00%	1,90	94,62%
Boas	-R\$ 2.125.790,13	86,91%	100,00%	3,29	86,91%
Comuns	-R\$ 2.987.340,40	0,51%	100,00%	46,77	0,51%

Fonte: Autor.

Utilizando a “Prática Comum de Manutenção” e substituindo apenas os itens danificados é possível observar uma pequena redução do VPL, confiabilidade e também o aumento das horas utilizadas de manutenção se comparado com o cenário anterior. Nessa situação, talvez em detrimento de uma melhor confiabilidade a bomba API utilizando as “Melhores Práticas de Instalação e Uso” mesmo com VPL ligeiramente superior pode ser considerada seja a melhor opção.

### 5.3 ANÁLISE #3

Para essa terceira análise, além dos 03 modelos de equipamentos que serão avaliados em todas as “Condições de Instalação e Uso” os seguintes parâmetros serão considerados:

- “01(x) Bomba” (sem a consideração de bomba reserva)
- “Melhores Práticas de Manutenção” (Substitui também itens relacionados).

Na Figura 5.3.1 será possível verificar os resultados destacado em amarelo para as melhores condições e vermelho as piores condições observadas.

Figura 5.3.1 Resultados da Análise 3#

Práticas de Instalação e Uso		Bomba ANSI				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)	
Melhores	-R\$ 2.879.715,37	67,82%	99,98%	1,80	67,81%	
Boas	-R\$ 4.116.567,03	50,23%	99,96%	3,13	50,21%	
Comuns	-R\$ 48.107.911,61	0,00%	99,37%	55,43	0,00%	
Práticas de Instalação e Uso		Bomba ANSI Extendida				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)	
Melhores	-R\$ 2.838.370,30	71,83%	99,98%	1,90	71,81%	
Boas	-R\$ 3.997.265,68	54,70%	99,96%	3,40	54,68%	
Comuns	-R\$ 41.154.462,76	0,02%	99,44%	49,21	0,02%	
Práticas de Instalação e Uso		Bomba API				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)	
Melhores	-R\$ 2.757.993,53	78,93%	99,98%	1,78	78,92%	
Boas	-R\$ 3.655.867,17	66,85%	99,96%	3,08	66,83%	
Comuns	-R\$ 32.065.742,20	0,54%	99,53%	41,26	0,53%	

Fonte: Autor.

Utilizando agora apenas “01(x) Bomba” de forma contra intuitiva é possível observar um aumento significativo do VPL em detrimento a uma redução do investimento inicial para compra de apenas um equipamento.

Mesmo quando considerado um equipamento do tipo “API” que oferece maior critérios em seu processo de especificação. De qualquer forma os valores de disponibilidade continuam satisfatório, ao contrário da taxa de confiabilidade e efetividade se comparada aos exemplos anteriores.

Na pior situação se observado o tipo ANSI associado as “Práticas Comum de Instalação e Uso” praticamente a confiabilidade e taxa de efetividade chegam a ficar zerados dado o elevado número de falhas. E o VPL absurdamente superior em todos os tipos de equipamentos

## 5.4 ANÁLISE #4

Para essa quarta e última análise, além dos 03 modelos de equipamentos que serão avaliados em todas as “Condições de Instalação e Uso” os seguintes parâmetros serão considerados:

- “01(x) Bomba” (sem a consideração de bomba reserva)
- “Práticas Comum de Manutenção” (Substitui apenas itens danificados).

Na Figura 5.4.1 **Figura 5.3.1** será possível verificar os resultados destacado em amarelo para as melhores condições e vermelho as piores condições observadas.

Figura 5.4.1 Resultados da Análise 4#

Práticas de Instalação e Uso	Bomba ANSI				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)
Melhores	-R\$ 2.980.923,67	65,13%	99,98%	1,94	65,11%
Boas	-R\$ 4.351.114,50	45,32%	99,96%	3,53	45,30%
Comuns	-R\$ 56.092.692,88	0,00%	99,29%	61,84	0,00%
	Bomba ANSI Extendida				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)
Melhores	-R\$ 2.973.260,28	67,91%	99,98%	2,17	67,89%
Boas	-R\$ 4.244.893,27	50,48%	99,96%	3,80	50,46%
Comuns	-R\$ 48.945.665,65	0,01%	99,35%	56,63	0,01%
	Bomba API				
	VPL	R(t)	A(t)	Man. (Hrs)	R(t)*A(t)
Melhores	-R\$ 2.815.306,14	77,09%	99,98%	1,93	77,07%
Boas	-R\$ 3.851.088,88	63,88%	99,96%	3,34	63,85%
Comuns	-R\$ 37.294.855,78	0,27%	99,47%	46,22	0,27%

Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÃO

Todo o equipamento possui uma confiabilidade inerente, o que resulta em uma taxa básica de falhas. A prática de instalação e uso altera essa taxa de falha básica para produzir a taxa de falha esperada para uma operação específica.

Os exemplos apresentados mostram técnicas para abordar uma série de alternativas de engenharia e encontrar os resultados através do uso de técnicas financeiras.

Sendo que o mesmo ativo físico ou equipamento pode produzir resultados diferentes de LCC em diferentes organizações, a partir do uso de diferentes bases de custo, taxas de desconto e uma série de outros detalhes.

Adicionar práticas de instalação e operação e suas consequências de custo ao LCC adiciona realidade à seleção de equipamentos. Quando os custos de falha são incluídos, a quantidade de mão de obra necessária pode ser projetada e esse estudo contribuir com regras práticas sobre como os orçamentos de manutenção ou substituição de equipamentos são estabelecidos.

De modo conclusivo, os detalhes do LCC são capazes de fornecer tanto aos grupos de engenharia ou financeiros um terreno comum para a comunicação.

### 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento desse trabalho foram considerados apenas os principais custos diretos envolvidos em projetos específicos de bombas centrífugas.

Como sugestão para trabalhos futuros um maior detalhamento dos custos indiretos envolvidos na área de engenharia e manutenção poderia tornar o objetivo de análise ainda mais eficaz.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 37. 1994.
- ANGELO, P. C. **Comparativo entre Métricas de Confiabilidade para Bombas Centrífugas Aplicadas na Indústria de Celulose**. UTFPR. Curitiba, p. 92. 2016.
- BARRINGER, P. **Life Cycle Costs & Reliability for Process Equipment**. 8th Annual Energy Week Conference & Exhibition. Houston: American Petroleum Institute. 1997. p. 22.
- BLOCH, H. P.; BUDRIS, A. R. **Manual do Usuário de Bombas: Entensão da Vida**. 3ª. ed. Lilburn, GA 30047: The Fairmont Press, Inc., v. I, 2010.
- DONALD W. BENBOW, H. W. B. O manual do Engenheiro de Confiabilidade certificado. In: O'MARA, P. **The Certified Reliability Engineer - Handbook**. 1ª. ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, v. I, 2009. Cap. 8, p. 360.
- EMILIO MENIN. **Manual de Bombas Centrífugas**. 1ª. ed. Jundiaí: Sulzer Brasil S/A, 2009.
- EUROPUMP, H. **Um guia de LCC - Análise para sistemas de Bombeamento**. 1ª. ed. Brussels: US Department of Energy, v. I, 2001.
- FIRJAN, S. Firjan. **Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro**, 2017. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/firjan/empresas/competitividade-empresarial/temas-em-destaque/energiaeletrica/custo/default-7.htm>>. Acesso em: 10 fev. 2020.
- LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, v. I, 2001.
- MATTOS, E. E. D.; FALCO, R. D. **Bombas Industriais**. 2ª. ed. [S.I.]: Interciência, 1998.
- MCC. Melhoria Continua Consultoria e Assessoria LTDA. **MCC Consultoria**, 2020. Disponível em: <<https://www.melhoriacontinuumcc.com.br/?p=2551>>. Acesso em: 17 fev. 2020.
- MORAIS, M. **Pesquisa Operacional Aplicada**. Fecilcam. Campo Mourão. 2010.



SÖNNICHSEN, N. The Statistics Portal for Market Data, Market. **Statista**, 2018. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/263492/electricity-prices-in-selected-countries/>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

SULZER. Sulzer. **Sulzer Ltda**, 2015. Disponível em: <[https://www.sulzer.com/brazil/-/media/files/products/pumps/single-stage-pumps/brochures/ahlstarendsuctionsinglestage\\_e10083.ashx?la=pt-br](https://www.sulzer.com/brazil/-/media/files/products/pumps/single-stage-pumps/brochures/ahlstarendsuctionsinglestage_e10083.ashx?la=pt-br)>. Acesso em: 07 mar. 2020.

YESYEN. <https://www.yesyen.com/>. **Yes Yen GraphiTech**, 2015. Disponível em: <[https://www.yesyen.com/centrifugal\\_pump\\_types.php](https://www.yesyen.com/centrifugal_pump_types.php)>. Acesso em: 10 Outubro 2015.