

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

RICARDO CAMARGO REGUS

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

MANUTENÇÃO DE MOTOBOMBAS CENTRÍFUGAS SUBMERSÍVEIS

Porto Alegre

2011

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

MANUTENÇÃO DE MOTOBOMBAS CENTRÍFUGAS SUBMERSÍVEIS

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2011

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

RICARDO CAMARGO REGUS

MANUTENÇÃO DE MOTOBOMBAS CENTRÍFUGAS SUBMERSÍVEIS

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro
UFRGS – Porto Alegre-RS, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre-RS, Brasil

Engº Alvaro Silveira Neto, Divisão de Manutenção - DMAE
PUCRS – Porto Alegre-RS, Brasil

Prof. Dr. Yeddo Braga Blauth, UFRGS
Doutor pela UFSC – Florianópolis-SC, Brasil

Porto Alegre, Julho de 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os envolvidos na concretização deste projeto, em especial ao meu Orientador, Prof. Dr. Luiz Tiarajú pela paciência nas correções, suporte, sugestões. Agradeço também, ao Eng^o Alvaro Silveira Neto do DMAE de Porto Alegre, por aceitar o convite de fazer parte da banca, ao Professor Yeddo pelo auxílio ao capítulo de proteções, ao Eng^o Anderson B. dos Santos e Eng^o Augusto Rodrigues da CORSAN pelo auxílio à parte de confiabilidade e dados estatísticos de falhas de motobombas submersíveis, e a Empresa PORTOBOMBAS pelo apoio, oportunidade de aprendizado e flexibilidade de horários.

Agradeço carinhosamente a minha família como um todo, a minha esposa Liane e ao meu pai, Eng^o Ronaldo, que me inspirou e incentivou a me aprofundar neste fascinante mundo das motobombas centrífugas e suas aplicações.

RESUMO

O presente Projeto de Diplomação consiste na fundamentação teórica, identificação de falhas, suas possíveis causas, técnicas de reparo, confiabilidade e custos, voltados para a manutenção de motobombas centrífugas submersíveis.

Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Manutenção de Motobombas Submersíveis. Bombas Centrífugas. Motores de Indução. Custos de Manutenção. Confiabilidade na Manutenção.

ABSTRACT

This project consists of theoretical foundation, fault identification, its possible causes, repair techniques, reliability and costs, used at maintaining in centrifugal submersible pumps.

Keywords: Electrical Engineering. Submersible Pumps Maintenance. Centrifugal Pumps. AC Induction Motors. Maintenance Costs. Maintenance Reliability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	12
2.1 Acionamentos e Motores de Indução.....	12
2.2 Ensaios.....	18
2.2.1 Ensaio a Vazio.....	18
2.2.2 Ensaio com Rotor Bloqueado.....	19
2.2.3 Ensaio de Motobombas Centrífugas.....	21
2.3 Bombas Centrífugas.....	22
2.3.1 Princípio de Funcionamento.....	22
2.3.2 Tipos de Motobombas Centrífugas.....	31
2.3.3 Tipos de Rotores.....	33
3 DEFEITOS.....	37
4 REPAROS.....	43
4.1 Ferramentas e Condições de Trabalho.....	43
4.2 Estoque.....	45
4.3 Procedimentos de Reparos.....	46
5 PROTEÇÕES ELÉTRICAS.....	57
6 CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE.....	59
6.1 Conceitos Básicos.....	60
6.2 Comparativo Entre Equipamentos Reparados e Novos.....	63
6.2.1 Tendência da Taxa de Envelhecimento.....	63
6.2.2 Avaliação da Vida Residual (AVR).....	66
6.2.3 Cálculo Econômico.....	67
6.2.4 Custo do Ciclo de Vida (Lyfe-Cycle Cost-LCC).....	69
6.2.5 Índice de Reparos.....	74
6.3 Excelência em Manutenção.....	76
6.3.1 Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).....	76
6.3.2 Manutenção Produtiva Total (MPT).....	77
7 ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS.....	78
7.1 O Fator Humano na Manutenção.....	79
7.2 O Fator Humano na Operação.....	80
7.3 O Fator Tempo.....	81
7.4 O Fator Equipamentos.....	82
7.5 O Fator Organização.....	82
8 CONCLUSÃO.....	84
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Típicas motobombas submersíveis reparadas.....	11
Figura 2	Curva típica de conjugado x velocidade de um motor de indução operando com tensão e frequências constantes.....	13
Figura 3	Circuito equivalente monofásico de um motor de indução polifásico.....	14
Figura 4	Circuito equivalente do motor de indução simplificado pelo teorema de Thévenin.....	15
Figura 5	Linhas de corrente em uma bomba centrífuga LOWARA modelo CO500 gerada pelo software FLUENT de análise CFD (Computer Fluid Dynamics).....	24
Figura 6	Vista em corte do corpo ou voluta da bomba e sua seção transversal.....	24
Figura 7	Diagrama das velocidades para uma partícula líquida M.....	25
Figura 8	Diagramas para o estabelecimento da Equação de Euler.....	25
Figura 9	Curva de performance padrão ISO9906/annex A, extraída do software de dimensionamento FLYGT FLYPS 3.1.....	30
Figura 10	Motobombas e misturadores submersíveis LOWARA (esq.) e FLYGT (dir.).....	31
Figura 11	Típicas motobombas submersas LOWARA para poços artesianos de 4" a 12".....	31
Figura 12	Motobombas centrífugas monobloco LOWARA verticais (esq.) e horizontais (dir.) em inox.....	32
Figura 13	Típica motobomba bi-partida GOULDS.....	33
Figura 14	Motobomba horizontal LOWARA com base e luva.....	33
Figura 15	Exemplo de rotor aberto FLYGT resistente a abrasão.....	33
Figura 16	Exemplo de rotor semi-aberto de alto rendimento FLYGT para esgotos.....	34
Figura 17	Exemplo de rotor de canal FLYGT para esgotos.....	34
Figura 18	Exemplo de rotor de vórtex FLYGT visto dentro da voluta ou caracol da bomba.....	34
Figura 19	Exemplo de rotor de hélice FLYGT.....	35
Figura 20	Exemplo de rotor de corte FLYGT.....	35
Figura 21	Exemplo de rotor triturador FLYGT.....	35
Figura 22	Exemplo de rotor fechado em ferro fundido.....	36
Figura 23	Contribuição proporcional das diferentes espécies de erro humano para a falha do sistema.....	37
Figura 24	Gráfico das causas mais comuns de queima do motor elétrico em motobombas submersíveis.....	40
Figura 25	Exemplos de danos em motores trifásicos de indução WEG.....	42
Figura 26	Aplicação de megômetro aos terminais do bobinado do motor elétrico da motobomba submersível.....	46
Figura 27	Motobomba submersível desmontada.....	48
Figura 28	Estufa para secagem do motor elétrico.....	48
Figura 29	Máquina para enrolamento dos condutores das bobinas.....	49
Figura 30	Esquema de ligação trifásica dos estatores FLYGT com 12 pontas, 380V, ligação estrela paralelo...50	50
Figura 31	Carcaça e terminais de ligação do motor elétrico rebobinado.....	51
Figura 32	Vista em corte de uma motobomba submersível FLYGT.....	52
Figura 33	Vista explodida de motobomba centrífuga em inox LOWARA.....	53
Figura 34	Lista de peças de motobomba centrífuga em inox LOWARA.....	54
Figura 35	Eixo rotor com rolamentos, alojamento do rolamento e selo mecânico.....	55
Figura 36	Extração dos rolamentos na prensa.....	55
Figura 37	Fluxograma básico de reparos de motobombas centrífugas submersíveis.....	56
Figura 38	Quadro elétrico de motobomba submersível padrão CORSAN.....	59
Figura 39	Taxa de falhas dada pela forma da curva da banheira.....	64
Figura 40	Taxa de falhas em função do tipo de reparo ao longo do tempo.....	65
Figura 41	Gráfico comparativo entre custo de aquisição e consumo de motobomba submersível.....	69
Figura 42	Utilização do Software FLYPS3.1 para avaliação do LCC de uma motobomba submersível FLYGT...71	71
Figura 43	Gráfico da avaliação percentual do LCC de uma motobomba submersível FLYGT.....	72
Figura 44	Resumo dos resultados da simulação do LCC FLYGT.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMT: Altura Manométrica Total

AVR: Avaliação da Vida Residual

CORSAN: Companhia Riograndense de Saneamento

DIN: Instituto Alemão para Padronização (*Deutsches Institut für Normung*)

DMAE: Departamento Municipal de Água e Esgotos

FMM: Força Magneto Motriz

HI: Instituto Hidráulico (*Hydraulic Institute*)

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO: Organização para Padronização Internacional (*International Organization for Standardization*)

LCC: Custo do Ciclo de Vida (*Lyfe-Cycle Cost*)

MC: Manutenção Corretiva

MCC: Manutenção Centrada na Confiabilidade

MP: Manutenção Preventiva

MPT: Manutenção Produtiva Total

NPSHR: Altura requerida de sucção positiva (*Net Positive Suction Head Required*)

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução são constituintes fundamentais de motobombas centrífugas e apresentam a maior incidência de falha nesses equipamentos. As motivações para esse Projeto podem ser resumidas em duas perguntas fundamentais: até que ponto vale a pena reparar um equipamento usado e não substituí-lo por um novo? Como garantir a qualidade técnica de serviço de reparo evitando novas falhas que acarretam custos, trazendo insatisfação de clientes e conseqüentemente o sucateio de boas máquinas?

Esses questionamentos serão respondidos e será mostrado que a manutenção de qualidade é uma especialidade da engenharia que requer grande embasamento teórico, perspicácia na identificação e solução de problemas visando à redução de custos, fidelização dos clientes ou satisfação dos diretores da empresa.



Figura 1 Típicas motobombas submersíveis reparadas.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A manutenção de motobombas começa com a definição de seus constituintes básicos, sua análise quantitativa e formas de ensaio. Uma motobomba centrífuga é constituída por uma bomba centrífuga acoplada a um motor elétrico de indução trifásico ou monofásico. De maneira a se obterem informações a respeito das características dos equipamentos, os motores elétricos podem ser ensaiados pelo método de ensaio a vazio ou rotor bloqueado. As bombas centrífugas possuem uma curva característica, chamada curva de performance em função da vazão e pressão, que pode ser levantada em ensaio de bancada a serem melhor definidos nas seções subseqüentes.

2.1 Acionamentos e Motores de Indução

Em um motor de indução trifásico, são induzidas tensões e correntes no rotor, através do campo gerado pelos enrolamentos do estator pelo entreferro. O campo girante trifásico do estator é responsável pela produção de conjugado e de conjugado de partida. Os motores monofásicos não apresentam conjugado de partida e dessa forma, requerem circuitos auxiliares para partir. Em motobombas centrífugas monofásicas, é comum a utilização de capacitores permanentes para partida. Durante o funcionamento normal do motor de indução trifásico, o rotor gira no sentido de rotação da força magneto motriz (FMM) produzida pelas correntes do estator, na velocidade entre zero e a velocidade síncrona, e o correspondente escorregamento s está entre 1,0 e 0, conforme ilustrado na figura 2 (Fonte: FITZGERALD, 2006, p. 299).

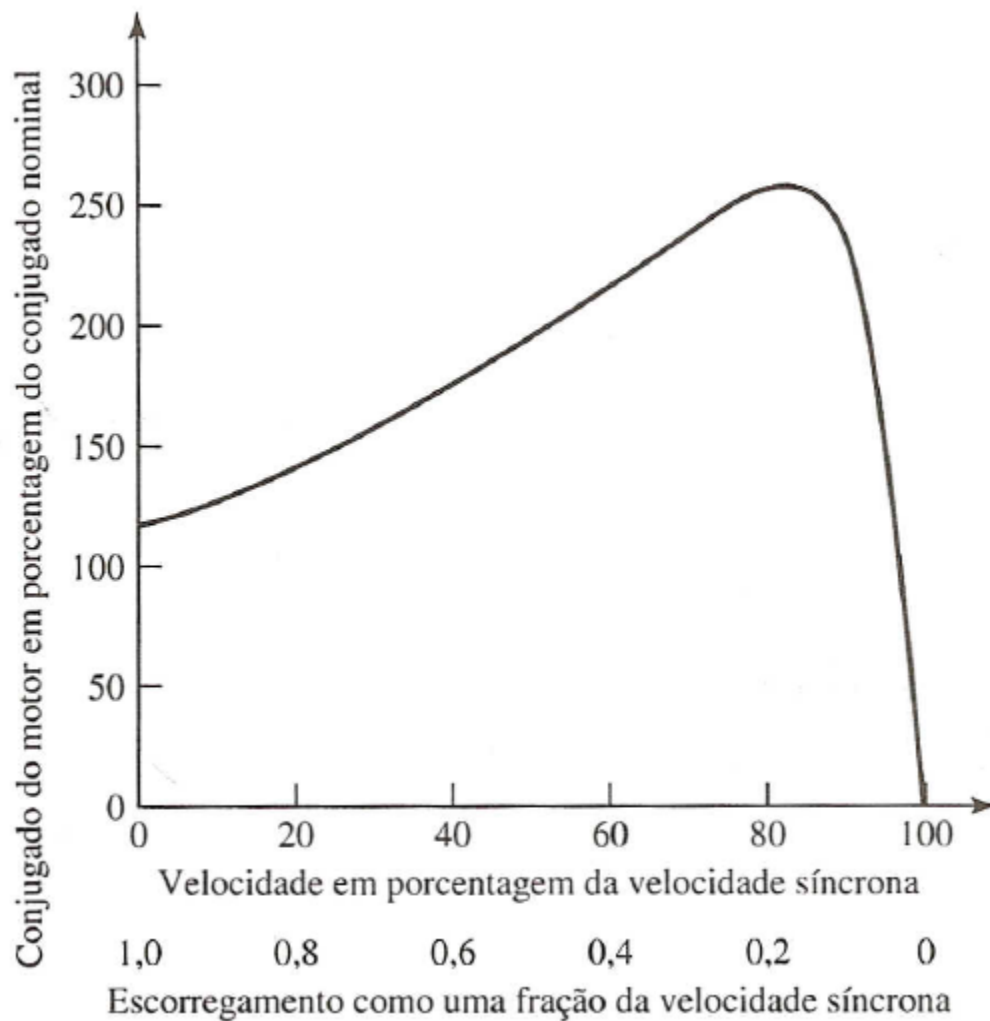


Figura 2 Curva típica de conjugado x velocidade de um motor de indução operando com tensão e freqüências constantes

(FITZGERALD, 2006, p. 299).

Na partida, o escorregamento é igual a 1. Para que o rendimento seja elevado em condições normais de funcionamento é necessária uma resistência de rotor baixa, mas, uma resistência de rotor baixa resulta em conjugado de partida baixo e altas correntes de partida para fatores de potência baixo. O circuito equivalente monofásico de um motor de indução polifásico é ilustrado no circuito da figura 3.

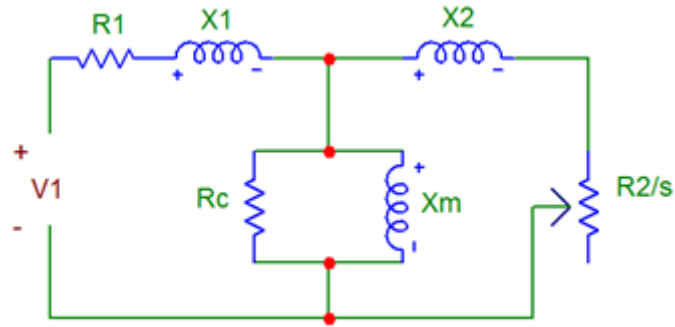


Figura 3 Circuito equivalente monofásico de um motor de indução polifásico.

Do circuito equivalente da figura 3 podem se obter as seguintes equações de tensão equivalente V_{1eq} dado pela equação 1, impedância equivalente Z_{1eq} dado pela equação 2, corrente I_2 dado pela equação 3, pela análise do circuito equivalente de Thévenin.

$$V_{1eq} = V_1 \left(\frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right) \quad (1)$$

$$Z_{1eq} = jX_m \left(\frac{R_1 + jX_1}{R_1 + jX_1 + jX_m} \right) \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{V_{1eq}}{Z_{1eq} + jX_2 + \frac{R_2}{s}} \quad (3)$$

Onde:

X_1 é a reatância de dispersão do estator dada em $[\Omega]$

R_1 é a resistência efetiva do estator dada em $[\Omega]$

I_1 é a corrente do estator dada em $[A]$

X_2 é a reatância do rotor refletida ao estator dada em $[\Omega]$

R_2 é a resistência do rotor refletida ao estator dada em $[\Omega]$

I_2 é a corrente do rotor dada em $[A]$

X_m é a reatância de magnetização do estator dada em [Ω]

R_c é a resistência de perdas no núcleo que é desprezada na análise de Thévenin dada em [Ω]

O equivalente Thévenin é mostrado na figura 4.

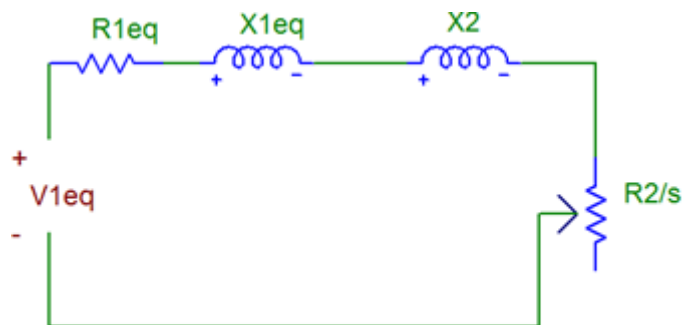


Figura 4 Circuito equivalente de um motor de indução simplificado pelo teorema de Thévenin.

A potência fornecida pelo estator ao rotor pelo entreferro é dada pela equação 4

$$P_g = n_{fases} I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) = P_{entrada} - P_{estator} \quad (4)$$

Onde:

n_{fases} é o número de fases do estator

A potência de entrada é dada pela equação 5

$$P_{entrada} = n_{fases} \text{Re}[V_1 I_1] \quad (5)$$

A potência dissipada no estator dada pela equação 6 e as perdas totais no rotor são dadas pela equação 7, que pode também ser obtida da multiplicação do escorregamento pela potência entregue ao entreferro dado pela equação 8:

$$P_{estator} = n_{fases} I_1^2 R_1 \quad (6)$$

$$P_{rotor} = n_{fases} I_2^2 R_2 \quad (7)$$

$$P_{rotor} = s P_g \quad (8)$$

A potência eletromagnética é dada pela equação 9

$$P_{em} = P_g - P_{rotor} \quad (9)$$

A potência no eixo é dada pela equação 10:

$$P_{eixo} = P_{em} - P_{av} - P_{núcleo} \quad (10)$$

Onde:

P_{em} é a potência eletromagnética dada em [W]

P_{av} são as perdas rotacionais por atrito e ventilação dada em [W]

$P_{núcleo}$ são as perdas de magnetização dada em [W]

O conjugado mecânico é dado pela equação 11

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_m} \quad (11)$$

E a velocidade angular mecânica do rotor ω_m é dada pela equação 12

$$\omega_m = \frac{2(1-s)\omega_e}{polos} \quad (12)$$

Onde

ω_e é a velocidade angular das correntes do estator dada em $\left[\frac{rad}{s}\right]$

A velocidade angular síncrona ω_s do campo girante é dada em $\left[\frac{rad}{s}\right]$ por

$$\omega_s = \frac{2\omega_e}{polos} \quad (13)$$

O conjugado eletromagnético dado pela equação 14 e de partida dado pela equação 15 são obtidos da análise do circuito equivalente Thévenin

$$C_{em} = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \frac{n_{fases} V_{1eq}^2}{\left(R_{1eq} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{1eq} + X_2)^2} \left(\frac{R_2}{s}\right) \quad (14)$$

$$C_{partida} = \frac{1}{\omega_s} n_{fases} I_2^2 R_2 \quad (15)$$

Pelo teorema da máxima transferência de potência obtém-se o escorregamento onde ocorre o conjugado máximo dado pela equação 16

$$S_{Cm\acute{a}x} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{1eq}^2 + (X_{1eq} + X_2)^2}} \quad (16)$$

2.2 Ensaaios

Os ensaios a vazio, com rotor bloqueado e medição das resistências CC dos enrolamentos do estator, possibilitam a obtenção dos parâmetros de circuito equivalente, necessários para o cálculo do desempenho de um motor de indução polifásico submetido a uma carga. As bombas centrífugas podem ser ensaiadas em bancada de testes onde através de medidores de vazão e pressão gera-se uma curva de performance hidráulica padrão para diversos pontos de operação.

2.2.1 Ensaio a Vazio

O ensaio a vazio de um motor de indução fornece informações em relação à corrente de excitação e às perdas a vazio. Geralmente, esse ensaio é executado em frequência nominal e com tensões polifásicas equilibradas, aplicadas aos terminais do estator.

$$V_{nom} = V_V \quad (17)$$

$$R_V = \frac{P_V}{n_{fases} I_V^2} \quad (18)$$

$$Z_V = \frac{V_V}{I_V} \quad (19)$$

$$Z_V = \sqrt{Z_V^2 - R_V^2} \cong X_1 + X_m \quad (20)$$

Onde:

V_V tensão de fase dada em [V]

R_V resistência dada em [Ω]

Z_V impedância dada em [Ω]

I_V corrente de fase dada em [A]

P_V potência trifásica a vazio dada em [W]

V_{nom} se refere a tensão nominal de fase dada em [V].

2.2.2 Ensaio com Rotor Bloqueado

O ensaio de rotor bloqueado ou travado de um motor de indução fornece informações sobre as impedâncias de dispersão. O rotor é bloqueado de modo que não possa girar (sendo o escorregamento, portanto, igual a unidade), e tensões polifásicas equilibradas são aplicadas aos terminais do estator.

$$I_{nom} = I_b \quad (21)$$

$$R_b = \frac{P_b}{n_{fases} I_b^2} \quad (22)$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} \quad (23)$$

$$Z_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} \cong X_1 + X_2 \quad (24)$$

$$R_2 = (R_b - R_1) \left(\frac{X_m + X_2}{X_m} \right)^2 \quad (25)$$

$$X_{bfr} = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} \quad (26)$$

$$X_b = \frac{f}{f_r} X_{bfr} \quad (27)$$

Onde:

V_b tensão de fase dada em [V]

R_b resistência dada em [Ω]

X_b reatância de rotor bloqueado corrigida para frequência reduzida dada em [Ω]

X_{bfr} reatância de rotor bloqueado com frequência reduzida dada em [Ω]

Z_b impedância dada em [Ω]

I_b corrente de fase dada em [A]

P_b potência trifásica com rotor bloqueado dada em [W]

I_{nom} se refere a corrente nominal de fase dada em [A]

f se refere a frequência nominal dada em [Hz]

f_r se refere a frequência do ensaio de rotor bloqueado (25% da frequência nominal, geralmente 15Hz) dada em [Hz]

2.2.3 Ensaio de Motobombas Centrífugas

As bombas centrífugas podem ser ensaiadas segundo norma brasileira NBR6400:1989- *Bombas hidráulicas de fluxo (Classe C)-Ensaio de desempenho e de cavitação*, internacional DIN ISO 9906:1999-*Rotodynamic pumps-Hydraulic performance acceptance tests-Grades 1 and 2*, em bancada de testes com medidores aferidos pelo INMETRO para levantamento da sua curva de performance característica. A motobomba é acoplada a flanges da tubulação de recalque dotados de medidores de vazão e pressão, válvula com registro que permita seu fechamento gradual de maneira a variar o ponto de operação para que possa ser traçada a curva de vazão por altura manométrica total (AMT) da bomba através da leitura de seis pontos sendo um a vazão zero, e calculados os rendimentos hidráulicos da bomba. Nesse ensaio, costumam ser medidos também, informações a respeito da motobomba como um todo, como tensão, corrente, potência, temperatura do motor. Também se verifica a espessura de pintura e aplicação de teste hidrostático a 1,5 vezes a pressão de vazão zero (shutt-off) ou 2,0 vezes a pressão de trabalho especificada na carcaça da bomba.

Os motores elétricos de indução utilizados em motobombas são ensaiados também para condições de tensão onde o motor 220/380V é submetido à tensão de trabalho de 1.000 V durante um minuto, medida a resistência de isolamento, o rendimento do motor a plena carga, a corrente nominal de partida à tensão nominal e levantada a curva de $\cos\phi$.

2.3 Bombas Centrífugas

As motobombas centrífugas são equipamentos largamente utilizados para bombeamento de fluidos em geral, como por exemplo, água limpa, esgotos, produtos químicos, drenagem, captação de água em indústrias, órgãos de saneamento e em obras de infraestrutura, como por exemplo, de hidroelétricas, pequenas centrais hidroelétricas (PCHs), túneis e barragens. Ao longo desta seção é apresentado o seu princípio de funcionamento, os tipos de motobombas centrífugas e de rotores (impulsores) mais utilizados.

2.3.1 Princípio de Funcionamento

Uma bomba centrífuga é um dispositivo mecânico girante desenvolvido para empurrar um fluido, principalmente água limpa ou suja contendo material sólido em suspensão e/ou outros produtos químicos, contra uma diferença de altura ou cota entre a sucção e o final da linha de recalque. A bomba converte trabalho mecânico em energia hidráulica, transferindo energia do eixo rotor para a corrente líquida. Segundo (MACINTYRE, 2010, p. 16) o Teorema de Bernoulli¹ exprime que em qualquer ponto que se considere de uma veia ou tubo de corrente de um líquido perfeito em escoamento permanente, sem fornecer ou receber energia ou efetuar trabalho, a soma da cota, com a altura representativa da pressão e com a altura representativa da velocidade, é constante, dada por

¹ **Daniel Bernoulli** (Groningen, 8 de fevereiro de 1700 — Basileia, 17 de março de 1782) foi um matemático holandês, membro de uma família de talentosos matemáticos, físicos e filósofos. É particularmente lembrado por suas aplicações da matemática à mecânica, especialmente a mecânica de fluidos, e pelo seu trabalho pioneiro em probabilidade e estatística, e o primeiro a entender a pressão atmosférica em termos moleculares.

$$h + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = E = \textit{constante} \quad (28)$$

Onde

γ é o peso específico do líquido

p é a pressão unitária

$\frac{p}{\gamma}$ é denominado altura representativa de pressão, altura de pressão estática, energia

específica de pressão ou cota piezométrica

h é a cota do centro de gravidade G do elemento

g é a aceleração da gravidade

v é a velocidade inicial

$\frac{v^2}{2g}$ é denominado altura representativa da velocidade, altura de pressão dinâmica ou

taquicarga

E é a energia total ou carga dinâmica

Resumidamente, o princípio de funcionamento das bombas centrífugas pode ser descrito pela transferência de energia hidráulica das pás do rotor ao líquido bombeado sob forma de energia de pressão e cinética, sendo o fluido impulsionado da parte interna do rotor para a parte externa como mostrado pelas linhas de corrente na figura 5, obtidas pelo software FLUENT de análise computacional de fluido dinâmica para uma bomba centrífuga LOWARA.

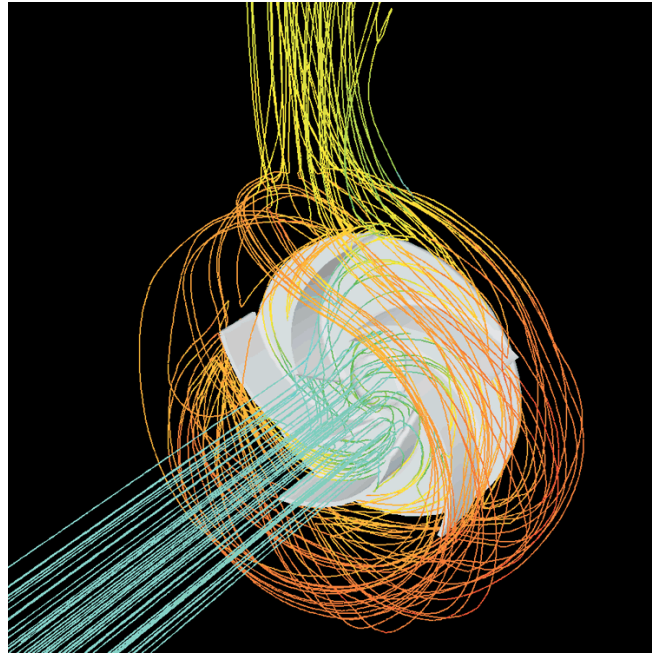


Figura 5 Linhas de corrente em uma bomba centrífuga LOWARA modelo CO500 gerada pelo software FLUENT de análise CFD (Computer Fluid Dynamics).

A figura 6 mostra uma bomba centrífuga vista em corte.

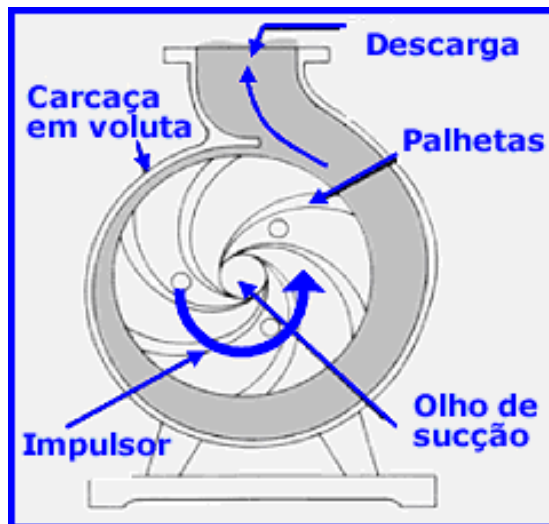


Figura 6 Vista em corte do corpo ou voluta da bomba e sua seção transversal.

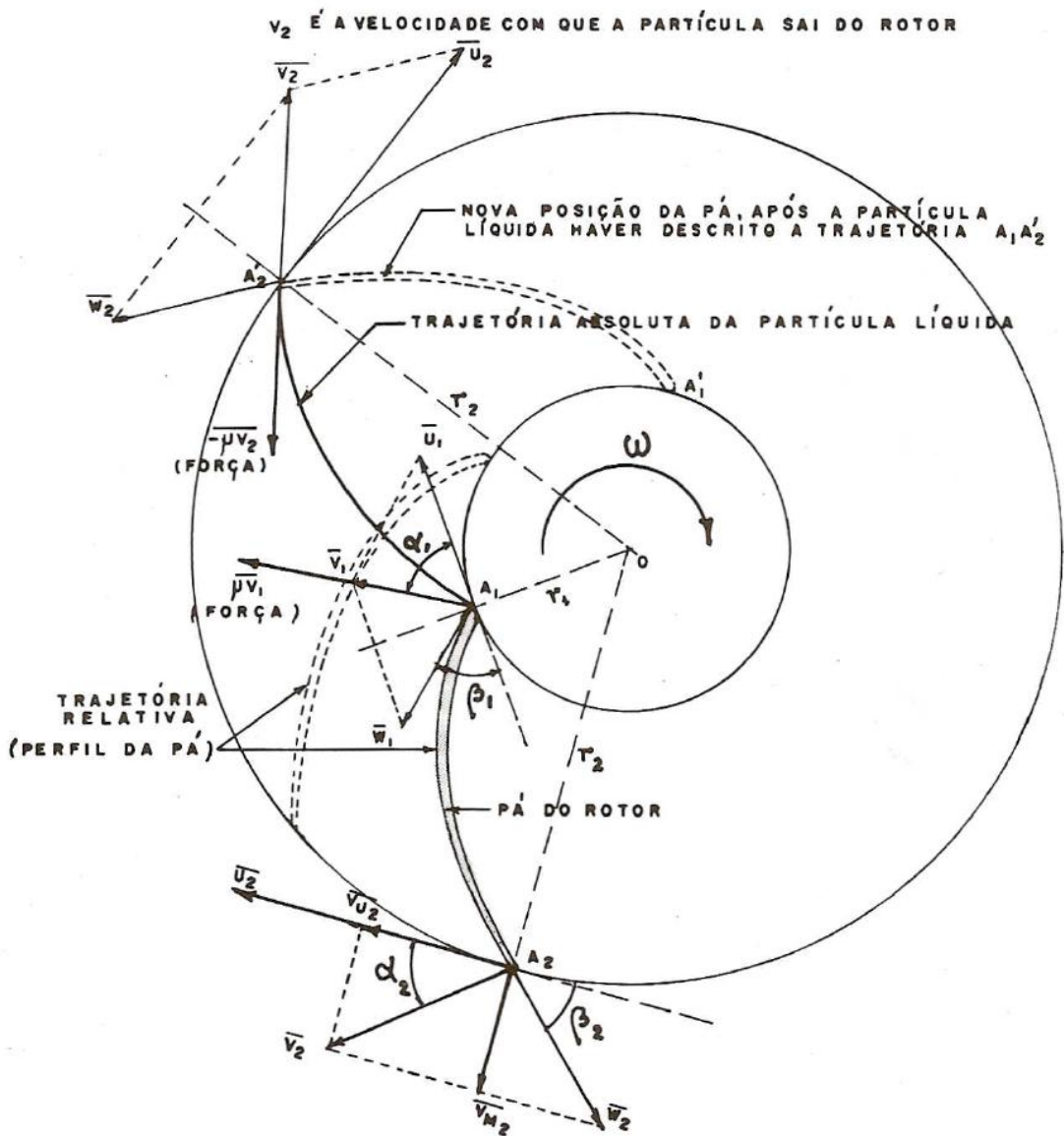


Figura 7 Diagrama das velocidades para uma partícula líquida M (MACINTYRE, 2010, p. 93).

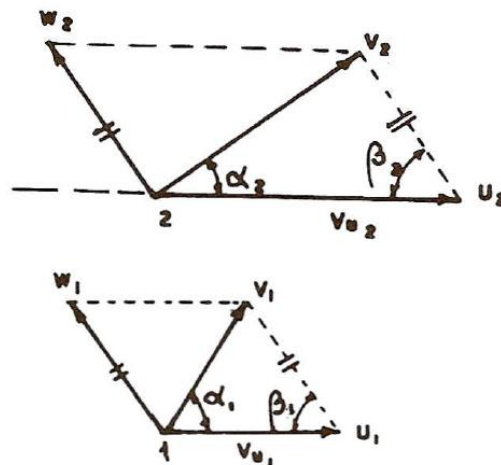


Figura 8 Diagramas para o estabelecimento da Equação de Euler (MACINTYRE, 2010, p. 99).

Segundo (MACINTYRE, 2010) a equação das velocidades ou da energia cedida ao líquido pelo rotor é dada por

$$H_e = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (29)$$

Onde

u_1 é o módulo do vetor velocidade periférica ou circunferencial do bordo de entrada do rotor

u_2 é o módulo do vetor velocidade periférica ou circunferencial do bordo de saída do rotor

w_1 é o módulo do vetor velocidade relativa tangente ao perfil da pá na entrada do rotor

w_2 é o módulo do vetor velocidade relativa tangente ao perfil da pá na saída do rotor

v_1 é o módulo do vetor velocidade absoluta de entrada da partícula no rotor

v_2 é o módulo do vetor velocidade absoluta de saída da partícula do rotor

Dado que, $u_1 = \omega \cdot r_1$ e $u_2 = \omega \cdot r_2$, temos que a equação fundamental das bombas centrífugas ou equação de Euler² é dada por

$$g \cdot H_u = \varepsilon(u_2 \cdot v_{u2} - u_1 \cdot v_{u1}) \quad (30)$$

² **Leonhard Paul Euler** (Basileia, 15 de abril de 1707 — São Petersburgo, 18 de setembro de 1783) foi um matemático e físico suíço que passou a maior parte de sua vida na Rússia e na Alemanha. Euler fez importantes descobertas em campos variados nos cálculos e grafos. Ele também fez muitas contribuições para a matemática moderna no campo da terminologia e notação, em especial para as análises matemáticas, como a noção de uma função matemática. Além disso ficou famoso por seus trabalhos em mecânica, óptica, e astronomia. Euler é considerado um dos mais proeminentes matemáticos do século XVIII. Teve como orientador Johann Bernoulli.

Onde

ω é a velocidade angular do rotor

r_1 é o raio circunferencial de entrada das pás do rotor

r_2 é o raio circunferencial de saída das pás do rotor

V_1 é o vetor velocidade absoluta de entrada do rotor

V_2 é o vetor velocidade absoluta de saída do rotor

v_{u1} é o módulo da projeção de V sobre U de entrada do rotor

v_{u2} é o módulo da projeção de V sobre U de saída do rotor

W é o vetor velocidade relativa

U é o vetor velocidade de arrastamento, periférica ou circunferencial

ε é o rendimento hidráulico

H_u é a altura útil de elevação

A altura útil de elevação H_u é a altura que a unidade de peso de líquido adquire em sua passagem pela bomba. O rendimento hidráulico ε é a relação entre a potência útil e a de elevação e é dado por

$$\varepsilon = \frac{H_u}{H_e} \quad (31)$$

Sendo J_ε são as perdas hidráulicas por kgf de líquido escoado, a altura total de elevação H_e é dada por

$$H_e = H_u + J_\varepsilon \quad (32)$$

As bombas centrífugas são também regidas por Leis de Semelhança Hidráulica ou Segundo (MACINTYRE, 2010, p. 125) de similaridade hidrodinâmica, tais que a variação das grandezas vazão ou descarga Q , altura manométrica H e potência absorvida do motor que aciona a bomba N com o número de rotações n para uma bomba de um dado diâmetro, são dadas por

$$\frac{Q_x}{Q} = \frac{n_x}{n} \quad (33)$$

$$\frac{H_x}{H} = \frac{n_x^2}{n^2} \quad (34)$$

$$\frac{N_x}{N} = \frac{n_x^3}{n^3} \quad (35)$$

O índice x se refere a um novo estado de funcionamento em outra rotação, a ausência do índice se refere ao estado atual. As bombas centrífugas costumam ser caracterizadas por uma curva de performance de vazão por AMT (Altura manométrica total). Segundo (MACINTYRE, 2010, p. 60) a altura manométrica de elevação ou simplesmente altura manométrica H também denotada por AMT é a diferença entre as alturas representativas das pressões na saída (convencionada) e na entrada da bomba e é dado por

$$H = H_a + H_r \quad (36)$$

Onde

H_a é a altura total de aspiração ou altura manométrica de aspiração

H_r é a altura total de recalque ou altura manométrica de recalque

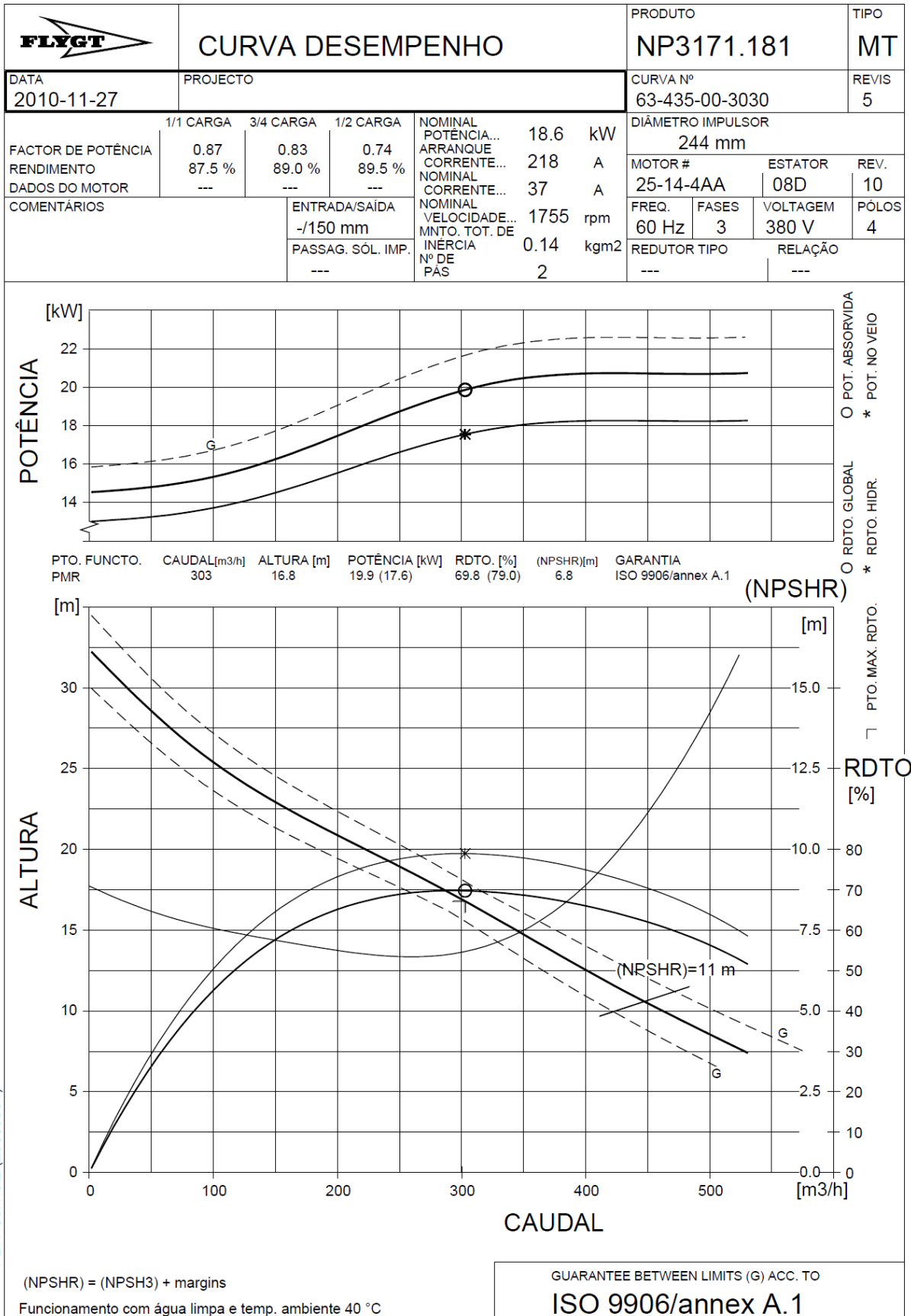
A altura total de aspiração ou altura manométrica de aspiração H_a (MACINTYRE, 2010), é a diferença entre as alturas representativas da pressão atmosférica local H_b e da pressão reinante na entrada da bomba que supomos ser igual a da entrada do rotor para o caso de uma instalação convencional de motobomba centrífuga com reservatório inferior e válvula de pé. Sendo J_a a perda de carga no encanamento de aspiração e aplicando a equação de conservação de energia entre a superfície livre do reservatório, onde supomos ser nula a velocidade do líquido, e a seção de entrada da bomba obtivemos

$$H_a = h_a + \frac{v_0^2}{2g} + J_a \quad (37)$$

Onde h_a é a altura estática de aspiração ou altura estática de sucção e representa a diferença a diferença de cotas entre o nível do centro da bomba e o da superfície livre do reservatório de captação. A altura total de recalque ou altura manométrica de recalque H_r é a diferença entre as alturas representativas da pressão na saída (convencionada) da bomba e a atmosférica (que supusemos fosse a reinante na saída da tubulação de recalque).

$$H_r = \left(\frac{p_3}{\gamma} + i \right) - H_b \quad (38)$$

Onde o primeiro termo $\left(\frac{p_3}{\gamma} + i \right)$, representa o valor da pressão absoluta na saída a uma distância vertical i referida ao centro da bomba. Definidos os termos, as curvas de performance contêm a potência no eixo, potência de entrada, rendimento hidráulico, rendimento e curva do motor elétrico, rendimento global, curva de NPSHr (Altura requerida de sucção positiva), diâmetro do impulsor e dados nominais do equipamento. Um exemplo de curva de performance é mostrado na figura 9. Os valores de potência consumida indicados na curva aumentam com a vazão e com o número de estágios da bomba centrífuga.



FLYPS3.1.6.2 (20060531)

Figura 9 Curva de performance padrão ISO9906/annex A, extraída do software de dimensionamento FLYGT FLYPS 3.1.

2.3.2 Tipos de Motobombas Centrífugas

As bombas centrífugas, subgrupo das turbobombas ou bombas rotodinâmicas, podem ser basicamente divididas em:

- submersíveis: de larga aplicação em bombeamento de esgotos, drenagem, irrigação e captação de água. Conforme ilustradas na figura 10.



Figura 10 Motobombas e misturadores submersíveis LOWARA (esq.) e FLYGT (dir.).

- submersas: utilizadas em poços artesianos e sistemas de pressurização de redes de abastecimento de água. Representadas na figura 11.



Figura 11 Típicas motobombas submersas LOWARA para poços artesianos de 4" a 12".

- monoblocos verticais ou horizontais: único estágio, multiestágios, auto-escorvantes, sanitárias, representadas na figura 12.



Figura 12 Motobombas centrífugas monobloco LOWARA verticais(esq.) e horizontais(dir.) em inox.

- bi-partidas: utilizada por grandes indústrias, órgãos de saneamento para grandes vazões e pressões de bombeamento, possuem elevado rendimento hidráulico de até 89% para água. Representada na figura 13.



Figura 13 Típica motobomba bi-partida GOULDS.

- horizontais: com base luva(acoplamento) e cavalete, representada na figura 14.

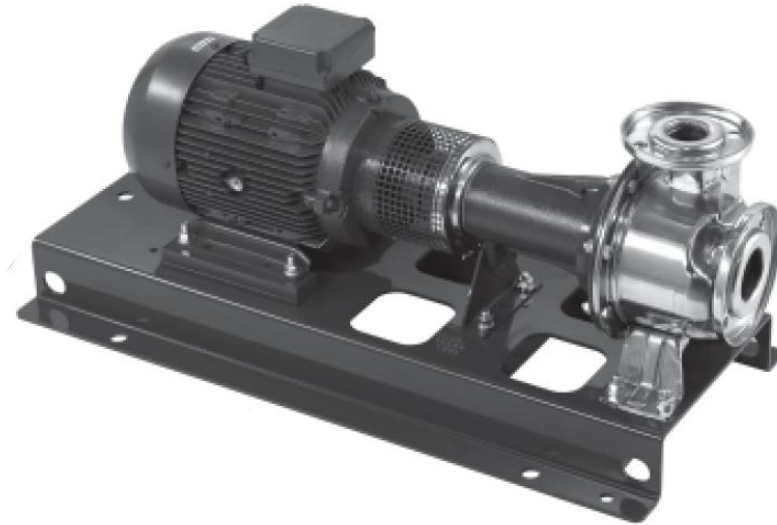


Figura 14 Motobomba horizontal LOWARA com base e luva.

2.3.3 Tipos de Rotores

Os rotores podem ser radiais, axiais ou uma combinação deles, gerando fluxo radial, axial ou misto, caracterizados pela trajetória que a partícula impulsionada descreve. Dependendo da aplicação podem ser resumidos em:

- aberto: ideal para drenagem de canteiros de obras contendo areia (abrasão) figura 15.



Figura 15 Exemplo de rotor aberto FLYGT resistente a abrasão.

- semi-aberto: ideal para esgotos cloacais e pluviais imune a entupimentos por fibras longas, figura 16.

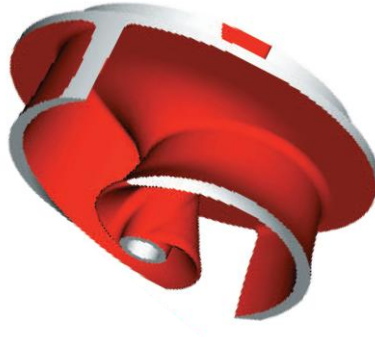


Figura 16 Exemplo de rotor semi-aberto de alto rendimento FLYGT para esgotos.

- de canal: utilizado para esgotos cloacais e pluviais, figura 17.



Figura 17 Exemplo de rotor de canal FLYGT para esgotos.

- vórtex: ideal para bombeamento de sólidos abrasivos como esgotos com areia, para baixas vazões e pequenas Amt, figura 18.



Figura 18 Exemplo de rotor de vórtex FLYGT visto dentro da voluta ou caracol da bomba.

- de hélice: elevado rendimento hidráulico, sendo utilizado para grandes vazões (mais de 700l/s) e baixas alturas manométricas totais (até 10mca), ideal para irrigação e esgotos pluviais municipais, figura 19.

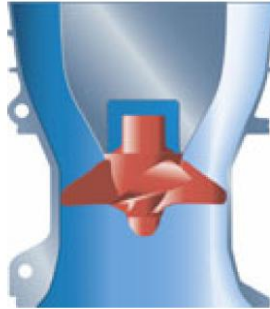


Figura 19 Exemplo de rotor de hélice FLYGT.

- de corte: utilizado em efluente que possui fibras longas, como por exemplo, de frigoríficos, figura 20.

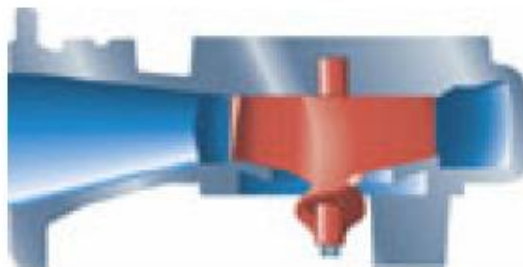


Figura 20 Exemplo de rotor de corte FLYGT.

- com roda de corte triturador: para baixas vazões (até 10l/s) e esgoto sob alta pressão (acima de 30m.c.a.), em tubulações de até 50mm, figura 21.



Figura 21 Exemplo de rotor triturador FLYGT.

- fechado: típico de motobombas centrífugas para água limpa, alto rendimento, figura 22.



Figura 22 Exemplo de rotor fechado em ferro fundido.

O Quadro 1 resume os principais tipos de rotores ou impulsores de motobombas e suas aplicações.

QUADRO COMPARATIVO ENTRE DIVERSOS ROTORES	
TIPO ROTOR	UTILIZAÇÃO
ABERTO	drenagem de água com areia
SEMI-ABERTO	esgotos cloacal e pluvial com fibras longas
CANAL	esgoto cloacal e pluvial
VÓRTEX	sólidos abrasivos, esgotos com areia
HÉLICE	controle de enchentes e irrigação
DE CORTE	esgoto com fibras longas
TRITURADOR	esgoto sob pressão
FECHADO	água limpa, produtos químicos

Quadro 1 Comparativo entre diversos rotores utilizados em motobombas.

Assim como o corpo das bombas, os rotores podem ser construídos de diferentes ligas e materiais, cada um com uma propriedade mais indicada para cada aplicação, podem ser construídos em ferro fundido cinzento GG25 ASTM A48 CL35, aço inox AISI304, AISI316,

AISI316L, Noryl, ferro fundido nodular, bronze, aço inox duplex, ferro fundido branco de alto cromo Hard Iron ASTM A 532 liga IIIA com dureza de 60HRC.

Dependendo do tipo de fluido bombeado, temperatura, pH, pressão e concentração de sólidos, dimensiona-se os selos mecânicos mais indicado para a aplicação. Os selos mecânicos de bombas centrífugas em geral são fabricados em carvão, cerâmica, óxido de alumínio, carbeto de silício, carbeto de tungstênio ou composição destes e outros materiais.

3 DEFEITOS

O tempo de vida operacional de uma motobomba centrífuga e principalmente do enrolamento de um motor elétrico trifásico depende de vários fatores, como: especificação correta (tensão, frequência, número de pólos, grau de proteção, etc.), instalação e operação correta, sistema de proteção elétrica, erro humano, etc. O fator erro humano pode ser dividido conforme a figura 23 (LAFRAIA, 2001).

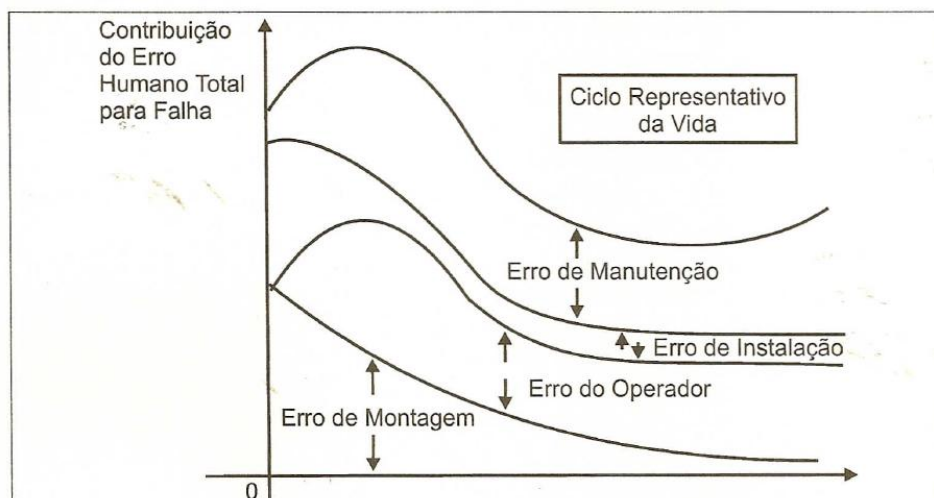


Figura 23 Contribuição proporcional das diferentes espécies de erro humano para a falha do sistema

(Fonte: LAFRAIA, 2001).

Um incidente é um tipo de erro humano sem conseqüências, porém importante ressaltar que muitos incidentes podem indicar estatisticamente a iminência de uma falha, defeito ou acidente com sérias conseqüências.

Caso ocorra a queima de um motor elétrico, deve ser identificada a causa (ou possíveis causas) da queima, mediante a análise do enrolamento danificado. Eliminando-se a causa, evita-se eventuais novas queimas do motor.

Uma Análise de Modos de Falhas e Efeitos (Failure Mode and Effect Analysis – FMEA) de motobombas centrífugas submersíveis, ilustrando modos, efeitos e causas de falhas é representada no Quadro 2.

MODO DA FALHA	EFEITO DA FALHA	CAUSA DA FALHA
Vazamento por desgaste dos selos mecânicos e anéis de vedação	Queima do motor elétrico ou atuação dos proteções	A passagem do fluido com partículas abrasivas ou corrosivas acabam por desgastar as faces do selo mecânico e anéis de vedação, permitindo a entrada de água na câmara do estator
Selo mecânico colado ou oxidado	Aumento da corrente de partida e queima do motor elétrico ou atuação dos proteções	A deposição de partículas, como por exemplo, cinzas de carvão mineral ou produtos químicos sobre as faces do selo mecânico, quando desligada a bomba, pode ocasionar a colagem das faces e conseqüente bloqueio do eixo na partida. Eventualmente pode ocorrer de a motobomba nova ou reparada parada por mais de um ano também colar ou oxidar o selo.
Impulsor bloqueado	Perda de vazão, elevação da corrente elétrica e queima do motor elétrico ou atuação dos proteções	Ocasionado por pedras, paus, folhas, lama em drenagem ou captação de água bruta, ou excesso de sólidos em suspensão ou sólidos de diâmetro maiores que o permitido pelo rotor de processo industrial, ou fibras longas, sacolas plásticas, garrafas pet, panos no caso de bombeamento de esgotos pluviais ou cloacais.
Quebra ou soltura do rotor	Perda de vazão, operação do motor em vazio	Choque de materias sólidos rígidos contra as pás do rotor, montagem e instalação incorretas
Entrada de água pelo cabo elétrico ou caixa de ligação	Queima do motor elétrico ou atuação dos proteções	Ocasionado por corte ou perfuração da borracha do cabo elétrico causada por esmagamento, atrito em estruturas, içamento pelo cabo elétrico, imersão em água ou incorreto armazenamento exposto ao tempo
Cortes e danos ao cabo elétrico	Desligamento do equipamento, queima do motor elétrico ou atuação dos proteções	Por atrito, esmagamento, sobrecorrente, perfuração, tração
Sub ou sobretensão de alimentação	Queima do motor elétrico ou atuação dos proteções	Ocasionada por distribuição em final de rede, sobrecarga, descargas atmosféricas, incorreto dimensionamento do cabo elétrico
Quebra do mancal ou rolamento	Bloqueio do rotor e queima do motor ou atuação dos proteções	Choque mecânico contra as pás do impulsor com deflexão do eixo, escorrimento da graxa de lubrificação por aquecimento da carcaça, defeito de fabricação ou fim da vida útil estimada em 50.000 horas para rolamentos de 1ª linha
Desgaste do rotor ou cavitação	Perda de vazão	Choque de materias sólidos rígidos contra as pás do rotor, montagem e instalação incorretas

Quadro 2 Análise FMEA de motobombas submersíveis (Fonte: Empresa PORTOBOMBAS).

O gráfico da figura 24 ilustra as causas percentuais mais comuns de falha de motobombas centrífugas submersíveis (Fonte: Empresa PORTOBOMBAS).

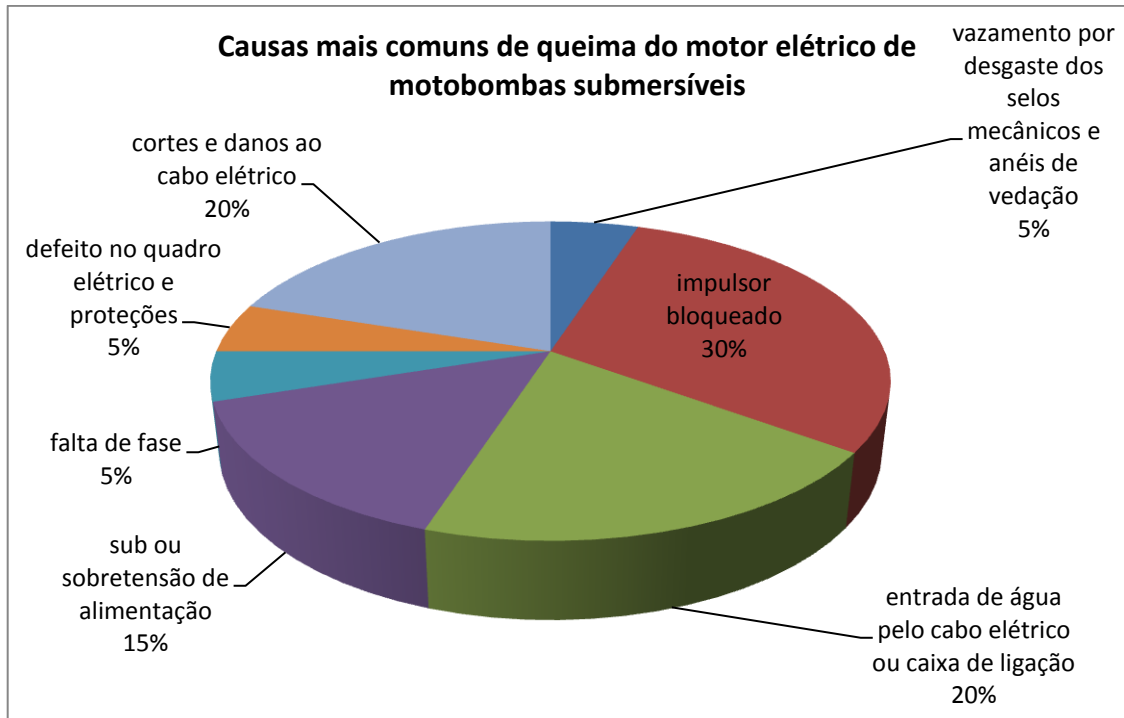


Figura 24 Gráfico das causas mais comuns de queima do motor elétrico em motobombas submersíveis

(Fonte: Empresa PORTOBOMBAS).

Exemplos de danos que ocorrem em enrolamentos são mostrados na figura 25 e suas possíveis causas no Quadro 3, segundo a WEG, consistem em:

CARACTERÍSTICA DA QUEIMA	POSSÍVEIS CAUSAS
Curto entre espiras ou Bobina curto-circuitada	-Falha do esmalte de isolamento do fio; -Falha do verniz de impregnação; -Contaminação interna do motor; -Rápidas oscilações na tensão de alimentação.
Curto entre fases	-Falha do material isolante; -Contaminação interna do motor; -Degradação do material isolante por ressecamento devido o motor operar com alta temperatura.
Curto na conexão	-Falha do material isolante; -Contaminação interna do motor; -Superaquecimento da conexão devido a mau contato.
Curto na saída da ranhura ou Curto no interior da ranhura	-Falha do esmalte de isolamento do fio; -Falha do verniz de impregnação; -Falha do material isolante; -Contaminação interna do motor; -Rápidas oscilações na tensão de alimentação; -Degradação do material isolante por ressecamento devido o motor operar com alta temperatura.
Pico de tensão	-Oscilação violenta na tensão de alimentação devido a, por exemplo, descargas atmosféricas; -Surtos de manobra de banco de capacitores; -Motor acionado por inversor de frequência com alguns parâmetros incorretos (amplitude do pulso de tensão, rise time, dV/dt, distancia entre pulsos, frequência de chaveamento).
Desbalanceamento de tensão	-Desequilíbrio de tensão e/ou de corrente entre as fases; -Oscilações de tensão nas três fases; -Falha em banco de capacitores; -Maus contatos em conexões, chaves, contatores, disjuntores, etc.;
Rotor Travado	-Travamento do eixo da carga; -Excessiva dificuldade na partida do motor, devido a elevada queda de tensão, inércia e torque de carga muito elevados.
Sobreaquecimento	-Excesso de carga na ponta de eixo (permanente ou eventual/periódico); -Sobretensão ou subtensão na rede de alimentação (permanente ou eventual/periódico); -Cabos de alimentação muito longos e/ou muito finos; -Excessivo número de partidas em tempo curto; -Conexão incorreta dos cabos de ligação do motor; -Ventilação deficiente (tampa defletora danificada ou obstruída, sujeira sobre a carcaça, temperatura ambiente elevada, etc.).
Falta de fase - motor ligado em estrela (queima de duas fases) ou triângulo (queima de uma fase)	-Queima de um fusível; -Rompimento de um cabo alimentador; -Queima de uma fase do transformador de alimentação; -Mau contato nos terminais de uma fase do transformador; -Mau contato em conexões; -Mau contato em chave, contator ou disjuntor.

Quadro 3 Características da queima de motores elétricos trifásicos de indução WEG e suas possíveis causas

(Fonte: Empresa WEG).



Figura 25 Exemplos de danos em motores trifásicos de indução WEG

(Fonte: Empresa WEG).

4 REPAROS

Os reparos, dentro da manutenção corretiva (mc) são a forma efetiva de recolocar o equipamento que apresenta falha novamente a operar. Para que se possa proceder aos reparos com qualidade e agilidade, são necessárias ferramentas, condições de trabalho, estoque de peças de reposição e procedimentos especializados.

4.1 Ferramentas e Condições de Trabalho

Para o desempenho de um serviço de manutenção padronizado de qualidade é necessário o uso, conservação de boas, limpas e adequadas, ferramentas e condições de trabalho. O serviço de manutenção de motobombas envolve organização e ferramental para limpeza, pintura, movimentação e transporte, usinagem, rebobinagem, tratamento térmico, solda, medição e teste, lubrificação, indução, lapidação, iluminação, ventilação e EPI's. Uma relação básica das ferramentas e equipamentos necessários ao desempenho de manutenção em motobombas centrífugas submersíveis é apresentado no quadro 4 (Fonte: Empresa PORTOBOMBAS).

FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS		
Alavanca	Alicate amperímetro	Caneta marcador
Alicate de corte	Arquivo de histórico de serviços	Jogo de chaves Philips
Alicate de eletricitista	Arquivo de manuais	Lixa de papel
Alicate de pressão	Bancada metálica para 0,5 tonelada	Luvas
Alicate p/ anel trava	Banqueta	Máquina para enrolamento dos condutores
Bornes de ligação	Bomba de óleo manual	Marreta
Botina de proteção	Cabine de jateamento	Martelo de borracha
Calça e camisa de manga longa, ou macacão de mecânico	Cabine de pintura com pistola	Megômetro
Caneta	Caixa de ferramentas	Morsa
Cordas	Caixas plásticas	Multímetro
Corrente	Caminhão para transporte e serviço	Óculos de proteção
Escova de aço	Compressor de ar comprimido e ferramentas	Óleo lubrificante
Estopas	Gerador	Óleo isolante
Estilete	Escada de alumínio	Painel de controle de motores com auto-transformador trifásico 380V 30Cv e soft-starters
Estopas	Esmerilhadeira	Pallets de madeira
Etiquetas de referência da empresa	Esquemas de ligação de motores	Panos trapos
Etiquetas de tensão	Estufa para motor	Paquímetro
Extrator de selo mecânico	Etiquetas de identificação de entrada	Pincel
Extrator de impulsor	Extintores de incêndio	Pranchetas
Extrator de rolamentos	Fasímetro	Prensa para 15 toneladas
Ficha de serviço	Girafa para 2 toneladas	Quadro de acompanhamento de serviços
Graxa para rolamentos de 1ª linha	Goleira com talha elétrica para 5 toneladas	Saponáceo e detergentes
Jogo de chaves allen	Iluminação auxiliar	Tanque 5m ³ para teste hidráulico de motobombas com medidor de vazão, manômetro e válvula registro gaveta
Jogo de chaves caximbo	Indutor de rolamentos	Tanque para lavagem de peças
Jogo de chaves de boca	Maçarico a gás	Tinta automotiva de secagem rápida
Jogo de chaves de fenda	Manuais de reparos	Tinta epóxi
Jogo de chaves estrela	Máquina de lavar peças à quente	Vassoura
Jogo de chaves L	Máquina de solda	Ventiladores

Quadro 4 Relação de ferramentas e equipamentos necessários para manutenção de motobombas centrífugas submersíveis

(Fonte: Empresa PORTOBOMBAS).

4.2 Estoque

Para o eficaz desempenho da manutenção em tempo hábil, é necessário que se tenha a disposição as peças mais comuns utilizadas na maior parte dos serviços de manutenção. Por isso um estoque bem planejado pode representar um pequeno investimento e um grande ganho de tempo. O quadro 5 apresenta uma relação básica de estoque de peças de reposição originais para manutenção de motobombas submersíveis (Fonte: Empresa PORTOBOMBAS).

RELAÇÃO DE ESTOQUE	
Cabos elétricos submersíveis	Parafusos Philips em inox
Capacitores de partida	Porcas sextavadas em inox
Jogo de anéis O'ring	Arruelas em inox
Jogo de rolamentos de 1ª linha	Conexões de descarga
Jogo de selos mecânicos	Anéis de desgaste
Placas de ligação	Difusores de entrada
Plaquetas de identificação	Difusores de saída
Reguladores de nível	Câmaras de óleo
Buchas de vedação	Alojamento do rolamento
Parafusos sextavados em inox	Alça
Parafusos allen em inox	Tampa
Prisioneiros	Terminais de ligação
Parafusos de fenda em inox	Motores

Quadro 5 Relação básica de estoque de peças de reposição originais

(Fonte: Empresa PORTOBOMBAS).

4.3 Procedimentos de Reparo

A manutenção corretiva (reparos) inicia com a entrada de motobomba na empresa para manutenção. É feita a limpeza do equipamento e inspeção visual preliminar de defeito ou avarias. A limpeza do equipamento constitui na aplicação de jato de areia ou granalha em equipamentos construídos em ferro fundido e posterior aplicação de uma demão de tinta de fundo. Para peças em inox ou alumínio a lavagem sobre pressão à quente com detergente é a melhor alternativa. A resistência de isolamento do motor elétrico deve então ser verificada diretamente nos terminais condutores do estator com a aplicação de megômetro tipo 5000 M Ω /2000V, marca YOKOGAWA como mostrado na figura 26.

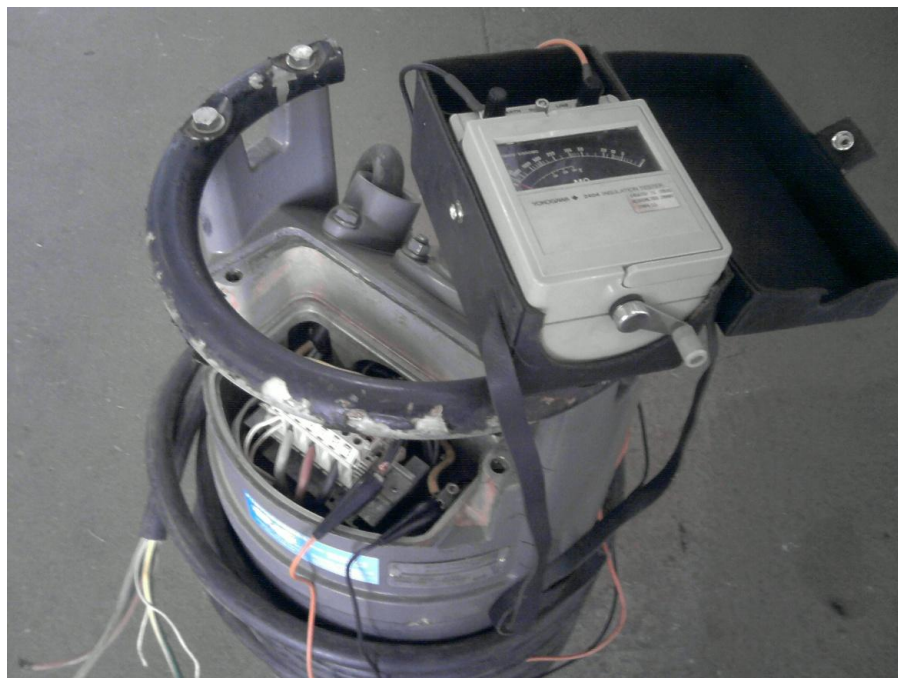


Figura 26 Aplicação de megômetro aos terminais do bobinado do motor elétrico da motobomba submersível.

O megômetro manual a manivela é um dispositivo que gera uma alta tensão de 2000V entre seus bornes pelo giro de uma manivela pelo operador para medição da resistência do

isolamento (resistência em $M\Omega$) entre fase e terra, sendo ∞ idealmente o valor da resistência a circuito aberto e 0Ω o valor da resistência a curto-circuito. A resistência de isolamento mínima para motores de indução, segundo a NBR5383-2002, pode ser determinada pela equação 39

$$R_m = kV + 1 \quad (39)$$

Onde:

R_m é a resistência de isolamento mínima recomendada, em megohms, com o enrolamento do motor a 40°C ;

kV é a tensão de linha nominal do motor em quilovolts (eficaz).

Sendo assim, para um motor em bom estado, com tensão de linha de 380V, considera-se mínimo tolerável de $1,38M\Omega$, não sendo incomuns leituras de valores de 10 a 100 vezes o mínimo recomendado. Caso a leitura que costumava ser superior ao valor mínimo recomendado caia próximo a esse valor, recomenda-se o recondicionamento. A resistência de isolamento da maioria dos materiais varia inversamente com a temperatura. A temperatura do enrolamento deve estar poucos graus acima do ponto de orvalho para evitar a condensação de umidade sobre a isolação do enrolamento durante a medição. É, também, importante que para a comparação de resistências de isolamento de enrolamentos de motores seja utilizada a base de 40°C . Estando o bobinado com resistência de isolamento abaixo do valor mínimo recomendado procede-se a desmontagem do equipamento para identificação da falha, secagem do motor elétrico em estufa e reavaliação. A figura 27

mostra uma motobomba submersível desmontada e a figura 28 mostra uma estufa para secagem de estatores.



Figura 27 Motobomba submersível desmontada.



Figura 28 Estufa para secagem do motor elétrico.

Caso o valor do isolamento esteja abaixo dos valores mínimos recomendados após a secagem e reavaliação, procede-se então a aplicação de verniz (re-vernizamento) ou a rebobinagem. Identificadas as falhas e suas possíveis causas, é elaborado um laudo técnico fotográfico e orçamento. As peças danificadas são substituídas por peças originais. Caso o motor elétrico esteja danificado, a forma de reparo mais comum é a rebobinagem que consiste na substituição de todos os enrolamentos do estator. Algumas vezes pode ser necessário também a substituição ou usinagem do eixo por problemas de desgaste para perfeito ajuste dos selos mecânicos e rolamentos. Inicialmente, procede-se a extração a quente do estator da carcaça do motor pois, durante o processo de fabricação ele é aquecido para dilatar a carcaça e obter-se maior firmeza quando resfriada a peça, em seguida remove-se todos os condutores do núcleo. Na seqüência, utiliza-se uma máquina mostrada na figura 29 para enrolar as bobinas de fio esmaltado em número e tamanhos determinados pela potência, tensão e nº de pólos do motor.



Figura 29 Máquina para enrolamento dos condutores das bobinas.

O operador então coloca em disposições específicas as bobinas no núcleo e efetua sua ligação interna (geralmente os motores rebobinados são uma cópia do antigo motor, raramente se tem que recalcular os condutores, exceto em casos de falha de projeto ou intenção de alteração de características nominais como tensão, nº pólos ou potência). As bobinas do estator são numeradas e conectadas entre si internamente em ligações que dependem da tensão requerida, do tipo de ligação e do número de terminais de saída do motor disponíveis para a ligação do motor em diferentes tensões de alimentação ilustrado na figura 30.

Esquema de ligação dos estatores
com 12 cabos

Ligação estrela paralelo - 380V

PARTIDA DIRETA 380V - COM BORNES

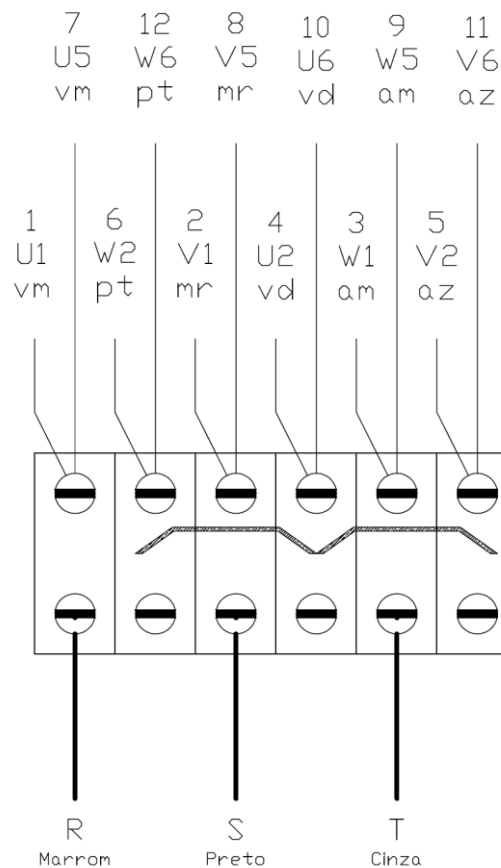


Figura 30 Esquema de ligação trifásica dos estatores FLYGT com 12 terminais, 380V, ligação estrela paralelo.

Novamente, procede-se a recolocação a quente do núcleo na carcaça, aplica-se uma camada adicional de verniz isolante e coloca-se em uma estufa ou é deixado ao ar livre para secagem do verniz. As classes de isolamento podem ser vistas no Quadro 6.

Classificação térmica do isolamento	Temperatura de referência °C
A	75
B	95
F	115
H	130

Quadro 6 Classes de Isolação de motores elétricos.

.Após algumas horas na estufa o motor está pronto para ser remontado e testado de volta na bomba. A figura 31 ilustra os 12 terminais de ligação e mais 2 terminais para os sensores térmicos de proteção.



Figura 31 Carcaça e terminais de ligação do motor elétrico rebobinado.

A figura 32 mostra uma vista em corte de uma motobomba submersível, a figura 33 uma vista explodida e a figura 34 uma lista de peças originais. Usualmente, quando ocorre

contaminação da câmara do estator por vazamento, na remontagem são trocados e lubrificados todos os mancais (rolamentos de esferas ou de rolos) e substituídos os anéis de vedação e selos mecânicos, que dependendo de seu estado podem vir a ser lapidados e reaproveitados, conforme figura 35.

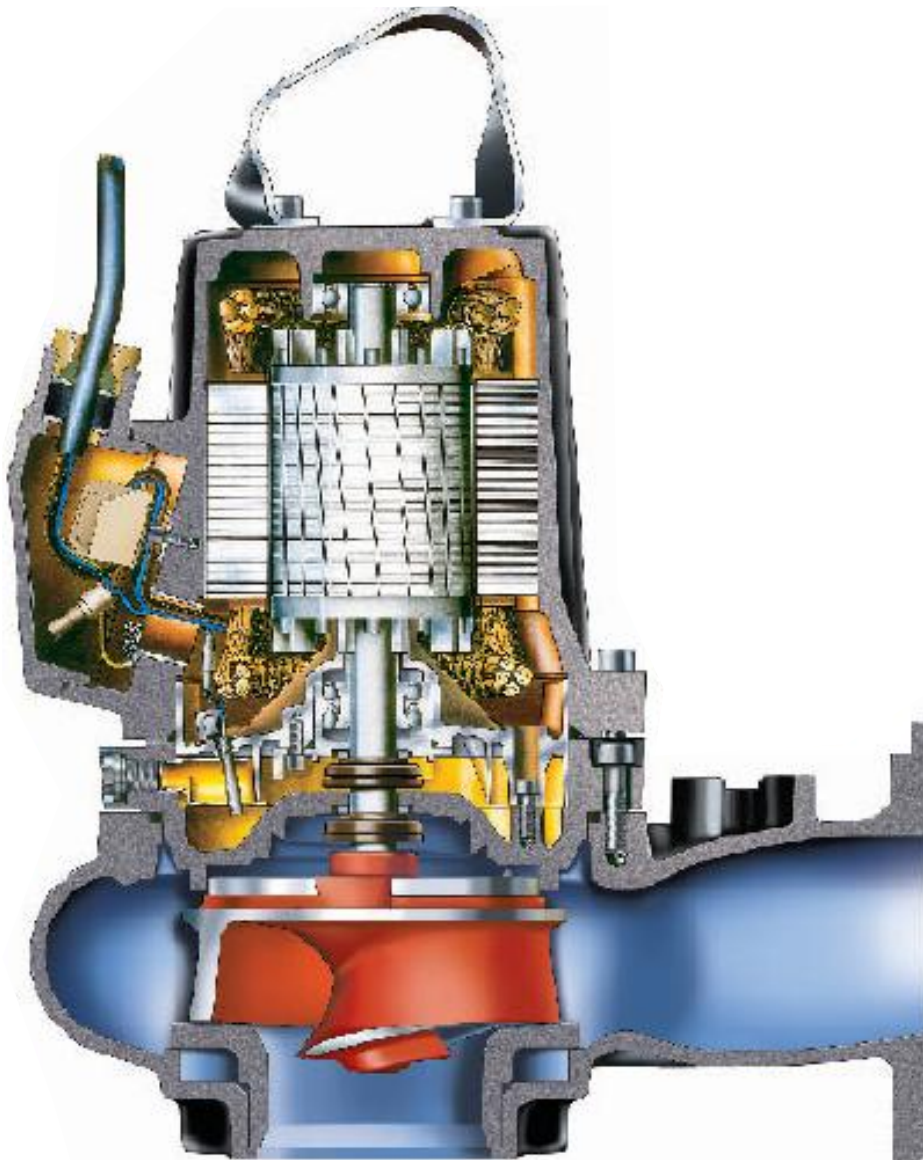


Figura 32 Vista em corte de uma motobomba submersível FLYGT.

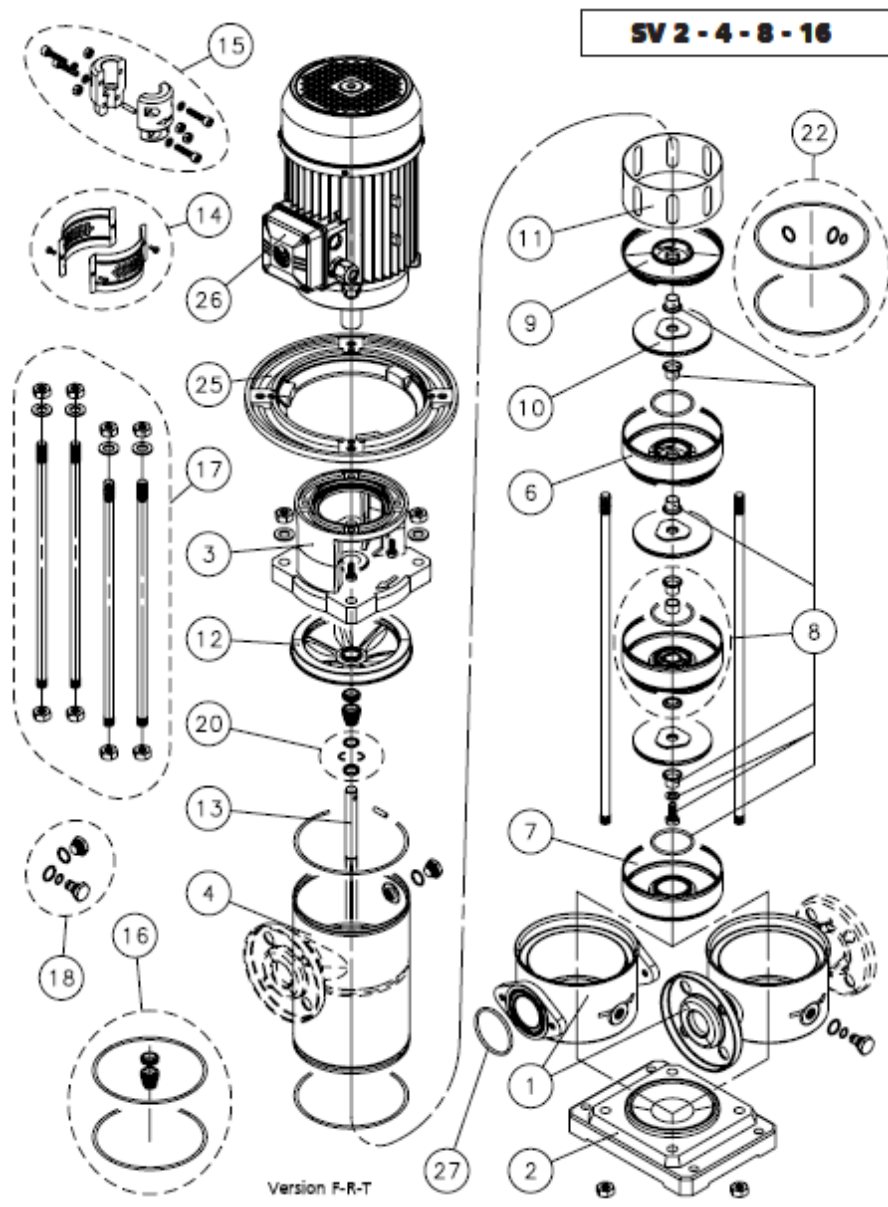


Figura 33 Vista explodida de motobomba centrífuga em inox LOWARA.



Lowara

SV2 F-T-R 2 Pole 60Hz

Production date >Jan00

ELP 2 P	SV202F05	SV203F07	SV204F11	SV205F11	SV206F15	SV207F15	SV208F22	SV209F22	SV211F30	SV212F30
F Version	1 ~ >	107400281	107400291	107400301	107400311	107400321		102550341		
	3 ~ >	107400021	107400031	107400041	107400051	107400061	107400071		107400091	102550111 102550131
	3 ~ >	SV213F30	SV215F40	SV216F40						
		102550131	102550151	102550161						
T Version	3 ~ >	SV202T05	SV203T07	SV204T11	SV205T11	SV206T15	SV207T15	SV208T22	SV209T22	
		107400020	107400030	107400040	107400050	107400060	107400070		107400090	
R Version	3 ~ >			SV204R11	SV205R11	SV206R15	SV207R15	SV208R22	SV209R22	SV211R30 SV212R30
				107400043	107400053	107400063	107400073		107400093	102550113 102550123
		SV213R30	SV215R40	SV216R40						
		102550133	102550153	102550163						
Stages number		2	3	4	5	6	7	8	9	11 12
		13	15	16						
Mot. power, kW>		0,55	0,75	1,1	1,1	1,5	1,5	2,2	2,2	3,0 3,0
		3,0	4,0	4,0						

Single Unit and Kit

4	Sleeve T-F	156403500	156403510	156403520	156403530	156403540	156403550	156403560	156403570	156403590	156403600
		156403610	156403630	156403640							
	Sleeve R			156404620	156404630	156404640	156404650	156404660	156404670	156404690	156404700
		156404710	156404730	156404740							
13	Shaft 304 S.S.	165041600	165041610	165041620	165041630	165041640	165041650	165041660	165041670	165041690	165041700
		165041710	165041730	165041740							
17	Tie rods kit	KL22ABL	KL22ABM	KL22ABN	KL22ABP	KL22ABQ	KL22ABR	KL22ABS	KL22ABT	KL22ABU	KL22ABV
		KL22ABW	KL22ABY	KL22ABZ							
Pump stack SV2F EPDM		102997701	102997711	102997721	102997731	102997741	102997751	102997761	102997771	102997781	102997791
		102997801	102997821	102997831							

Mechanical seal Kit

*16	Materials ->	Q1BEGG	Q1Q1EGG	Q1BVGG	Q1Q1VGG	Q1CTGG	Q1Q1TGG	STD -> Q1BEGG - OR EPDM
	Mech seal D12 + sleeve OR	KL01AAD	KL01AC7	KL01AAG	KL01AC9	KL01ADB	KL01ADD	

Wear Parts kit

		- > SV208	- > SV216	- > SV220	- > SV224
		1 bearing	2 bearing	3 bearing	4 bearing
*8	Wear parts incl. OR, EPDM	KL35AAP	KL35AAQ	KL35AAR	KL35AAS
	Wear parts incl. OR, FPM	KL35AAZ	KL35AA0	KL35AA1	KL35AA2
	Wear parts incl. OR, FEP	KL35AAC	KL35AAD	KL35AAE	KL35AAF

Common, Single Unit and kit

1	Pump body	151301200	-> SV2-4 T
		151301210	-> SV2F
		151301370	-> SV2R
2	Base	161430320	-> SV2-4 T
		161430330	-> SV2-4 F-R-N
6	Diffuser	152800860	
7	First stage box	152801020	
9	Last stage diffuser	152800960	
10	Impeller SVF	150702100	Example. SV207T156T = SV2, 7 STages, 1,5 kW, 60 Hz, 3 ~
11	Last stage spacer	162502240	
12	Seal housing disc	160101260	
18	Plugs	EPDM	KL34AAK
		FPM	KL34AAL
		FEP	KL34AAM
20	Impellers retainer	KL41AAV	
*22	OR	EPDM	KL02AA1
		FPM	KL02AA2
		FEP	KL02AA3
25	Motor flange	-	11,0 - 15,0 kW
27	Hoval flange OR, EPDM	002221866	
		002222623	->SV2-4 T

All Versions, wear OR not included

Motor, Coupling, Motor adaptor

**26	kW >	0,55	0,75	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0
Motor 2P, 1 ~ >			13259F00G	13278F00H	13282F00G	130647083		
	Motor 2P, 3 ~ >	107230080	107230140	107230160	107230200	107230220	107106255	107106316
3	Adaptor	161452701	161452711	161452711	161452721	161452721	161452761	161452761
14	Coupling guard	KL33AAD	KL33AAE	KL33AAE	KL33AAF	KL33AAF	KL33AAK	KL33AAK
15	Coupling	KL10ABC	KL10ABD	KL10ABD	KL10ABE	KL10ABE	KL10ABK	KL10ABK

* Recommended spare parts

** Motor spare parts: see motor lists

SV2-16F_6_Jan00_EdC

Figura 34 Lista de peças de motobomba centrífuga em inox LOWARA.



Figura 35 Eixo rotor com rolamentos, alojamento do rolamento e selo mecânico tipo cartucho.

Os mancais existentes na motobomba são extraídos com auxílio de uma prensa de 15ton conforme ilustra a figura 36. Para instalação de mancais novos no eixo eles são aquecidos por indução em uma máquina aquecedora de rolamentos causando sua dilatação para recolocação. Os aquecedores indutivos são o método mais indicado e mais seguro para aquecimento de um rolamento ao invés do uso de chama ou banho de óleo. Os aquecedores de rolamentos produzem fortes campos magnéticos alternados que induzem correntes no metal que causam aquecimento rápido e eficiente do componente.



Figura 36 Extração dos rolamentos na prensa.

Sempre que ocorre contaminação da câmara do estator pelo vazamento dos selos mecânicos, das vedações por anéis "O", da tampa de ligação ou entrada de água pelo cabo, procede-se a substituição dos rolamentos e a lapidação ou substituição dos selos mecânicos. Os conjuntos girantes de eixo induzido e rotor costumam ser balanceados antes da remontagem. Substituídas as peças danificadas, o equipamento é remontado e testado. Após repintado é embalado, faturado e entregue ao cliente, conforme fluxograma básico de reparos apresentado na figura 37.

FLUXOGRAMA BÁSICO DE REPAROS

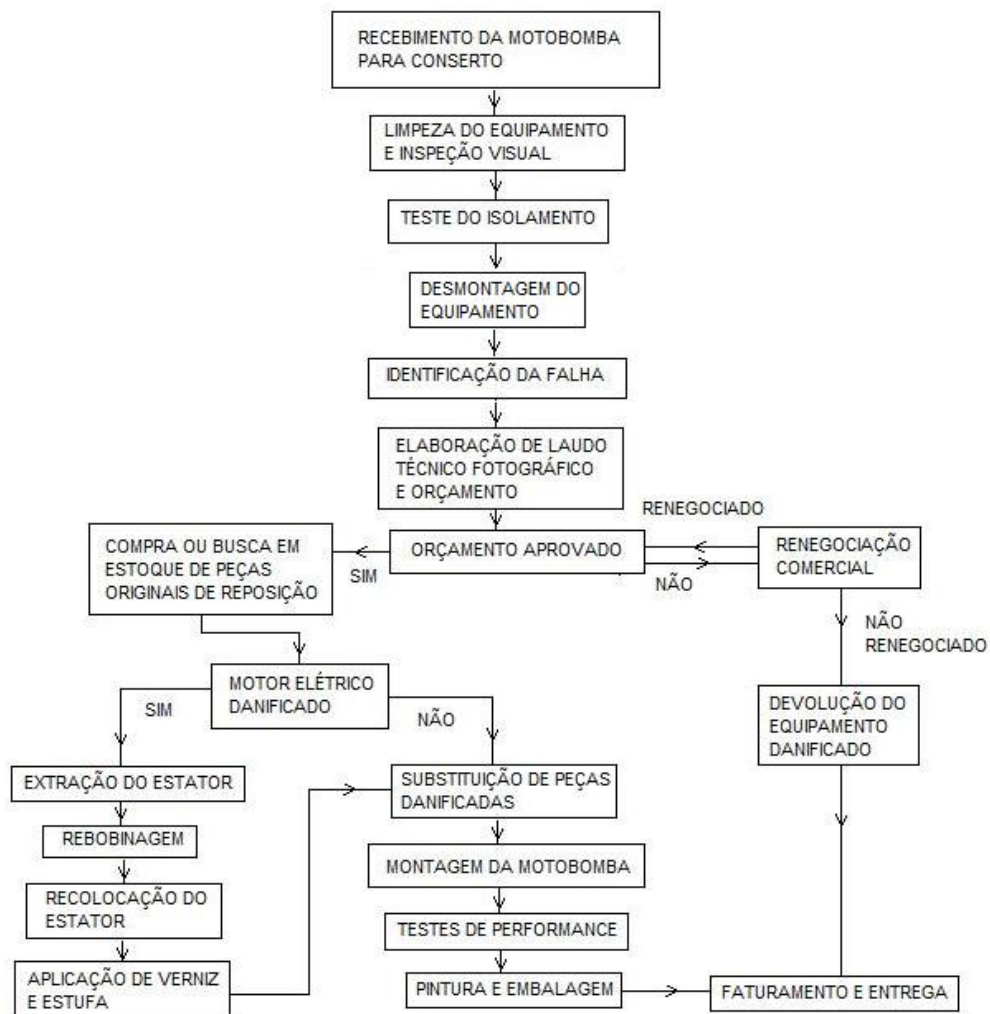


Figura 37 Fluxograma básico de reparos de motobombas centrífugas submersíveis.

5 PROTEÇÕES ELÉTRICAS

É de fundamental importância para o correto funcionamento, prevenção de falhas e choques elétricos com motobombas centrífugas, seja por erro humano ou por fatores inerentes a utilização da motobomba e da rede elétrica, como por exemplo descargas atmosféricas, falta de fase, bloqueio do rotor, inundação da casa de bombas (instalação em poço seco), a utilização de sistemas de proteção elétricas. As motobombas centrífugas devem ser ligadas a rede elétrica através um quadro de comando de partida elétrica aterrado.

Os quadros de comando de partida elétrica segundo Regulamento de Instalações Consumidoras (RIC) 2008 de baixa tensão da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), e segundo a NBR5410-2004 para tensão menor ou igual a 1000V em corrente alternada para frequências menores que 400Hz, podem ser divididos em partida direta com contactora até 7,5Cv em 380V, de 7,5Cv a 25Cv partida indireta por chave estrela-triângulo 380/660V ou chave compensadora. Costumam ser utilizados também para partida indireta por soft-starters e inversores de frequência. Os dispositivos mais utilizados em painéis de acionamento e proteção elétrica podem ser vistos no quadro 7 (Fonte: Empresa PORTOBOMBAS).

DISPOSITIVO	FUNÇÃO
SENSORES TÉRMICOS	Evitar sobreaquecimento do bobinado do motor elétrico
SENSOR DE UMIDADE	Detectar presença de água ou umidade na câmara do estator ou na câmara de óleo dos selos mecânicos
RELÉ FALTA DE FASE	Detectar falta de fase
RELÉ INVERSÃO DE FASE	Detectar inversão de fase
FUSÍVEIS	Evitar sobrecorrentes
DISJUNTOR	Evitar sobrecorrentes
CONTACTORA	Acionar o motor
DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS (DPS)	Dispositivo utilizado para limitar as sobretensões transitórias e escoar os surtos de corrente originários de descargas atmosféricas em redes de energia
DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO A CORRENTE DIFERENCIAL-RESIDUAL (DR)	Dispositivo utilizado para detectar fugas de correntes que possam existir em circuitos elétricos, desligando imediatamente a alimentação deles
SOFT-STARTER	Chave estática ajusta à tensão que chega ao estator do motor através de comando microprocessado que controlará os tiristores através da variação do ângulo de disparo dos mesmos. Desta forma, alivia os altos conjugados de aceleração do motor e protege a rede das correntes de partida elevadas. Estando com carga reduzida, o motor apresenta $\cos\phi$ abaixo do nominal minimizando as perdas por reativos, fornecendo a potência ativa necessária. A tensão de utilização deverá ser na faixa de 200 V – 15% a 500 V + 10%, sendo a faixa de frequência de 45 Hz até 66 Hz
INVERSOR DE FREQUÊNCIA	Inversor de frequência com capacidade de controle sem sensor, adequado para controlar a velocidade de motores trifásicos. O comando vetorial sem sensor deverá permitir ao inversor calcular as alterações necessárias na corrente de saída e na frequência, a fim de manter a velocidade desejada do motor ao longo de uma extensa faixa de condições de carga. Deverá ter capacidade de sobrecarga de 200% por 3 segundos seguida de 150% por 60 segundos

Quadro 7 Dispositivos de proteção elétrica (Fonte: PORTOBOMBAS).

Um exemplo de quadro elétrico de comando de motobombas centrífugas submersíveis utilizado em estação elevatória de esgotos da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) pode ser visto na figura 38.



Figura 38 Quadro elétrico de motobomba submersível padrão CORSAN.

6 CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE

A manutenção pode ser definida segundo a NBR5462 como “a combinação de todas ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.” Pode ser dividida basicamente em manutenção preventiva ou corretiva. A manutenção preventiva pode ser baseada no tempo de operação para evitar-se ou postergar-se a falha, na condição de operação onde detecta-se falhas ou sintomas ou no teste para identificação de falhas ocultas não detectáveis em condições normais de operação. A manutenção corretiva objetiva recolocar em funcionamento o equipamento após a ocorrência de uma falha. Já a

manutenibilidade segundo (LAFRAIA, 2001) “ é uma característica de projeto que define a facilidade de manutenção, o tempo de manutenção, os custos e as funções que o item executa.”

Dentre essas ações, podemos destacar os custos de manutenção, considerando até que ponto vale a pena reparar um equipamento e não substituí-lo por um equipamento novo?

Diversos fatores influenciam a probabilidade de falha de uma equipamento, como por exemplo, nível de proteção elétrica do quadro de acionamento, erro humano, defeito de fabricação, falha de projeto, falta de manutenção preventiva e preditiva, utilização inadequada para a finalidade do equipamento, regime de operação, nível de confiabilidade exigido.

6.1 Conceitos Básicos

Com o objetivo de estabelecer critérios para a avaliação de até que ponto vale a pena reparar um equipamento, precisamos definir os fatores que afetam essa estimativa.

A taxa de falhas λ para um conjunto de componentes de um sistema pode ser definida por

$$\lambda = \frac{\textit{n}^{\circ} \textit{ de falhas por unidade de tempo}}{\textit{n}^{\circ} \textit{ de componentes expostos a falha}} \quad (40)$$

O inverso da taxa de falhas (LAFRAIA, 2001) é conhecido com o tempo médio entre falhas (TMEF) é dado por

$$TMEF = \frac{1}{\lambda} \quad (41)$$

A função densidade de falhas representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo e é dada por

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (42)$$

A $F(t)$ representa a função acumulada de falhas e mostra a probabilidade de falha entre um período de tempo t_1 e t_2

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (43)$$

A confiabilidade ou sucesso $R(t)$ é dada por

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - F(t) \quad (44)$$

E a probabilidade de falha $F(t)$ é dada por

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (45)$$

Dependendo do tipo de dados de falhas conhecidos e do tipo de equipamento analisado escolhe-se a distribuição de probabilidades para análise. Para distribuições de probabilidades discretas pode-se utilizar a distribuição Binomial ou a de Poisson. Para distribuições de probabilidades contínuas tem-se funções densidade de probabilidade que podem ser do tipo, distribuição Normal ou Gaussiana, Log-Normal, Exponencial quando a taxa de falhas λ é constante, e de Weibull.

O quadro 7 ilustra dados de manutenção da CORSAN do ano de 2009 referente a motobombas submersíveis FLYGT como um todo, desconsideradas as idades dos equipamentos e histórico de falha de anos anteriores.

Modelo	Quantidade de equipamentos registrados	Quantidade de equipamentos mantidos 2009		R(t)	F(t)	Quantidade de equipamentos que poderão falhar em 12 meses	Índice máximo de reparo
B 2102	1	1	100%	0,76	0,24	0,24	50%
B 2125	9	4	44%	0,76	0,24	2,13	50%
B 2151	29	4	14%	0,76	0,24	6,85	50%
B 2201	1	1	100%	0,76	0,24	0,24	50%
BIBO 2201	1	1	100%	0,76	0,24	0,24	50%
BS 2050	6	4	67%	0,76	0,24	1,42	50%
BS 2066	1	1	100%	0,76	0,24	0,24	50%
BS 2102	3	1	33%	0,76	0,24	0,71	50%
BS 2201	2	1	50%	0,76	0,24	0,47	50%
CP 3068	3	1	33%	0,76	0,24	0,71	50%
CP 3085	18	1	6%	0,76	0,24	4,25	50%
CP 3101	3	1	33%	0,76	0,24	0,71	50%
CP 3102	4	2	50%	0,76	0,24	0,95	50%
CP 3126	12	4	33%	0,76	0,24	2,84	50%
CP 3127	26	1	4%	0,76	0,24	6,15	50%
CP 3140	4	1	25%	0,76	0,24	0,95	50%
CP 3152	13	3	23%	0,76	0,24	3,07	50%
CP 3201	4	1	25%	0,76	0,24	0,95	50%
CP 3301	3	1	33%	0,76	0,24	0,71	50%
CP 3300	19	3	16%	0,76	0,24	4,49	50%
CS3300LT	1	1	100%	0,76	0,24	0,24	50%
CS 3300	2	1	50%	0,76	0,24	0,47	50%
TOTAIS	165	39	24%				

Quadro 7 Dados de manutenção de motobombas submersíveis FLYGT da CORSAN (Fonte: CORSAN, 2009).

Importante destacar que o índice máximo de reparos apresentado foi definido empiricamente de acordo com a disponibilidade de recursos financeiros da CORSAN para o contrato de manutenção e índices de anos anteriores. Observou-se também que ainda não

existe controle por número de patrimônio ou de série do equipamento evitando que um equipamento que falhe mais de uma vez seja um dado representativo de toda a amostra, além dos erros envolvidos em considerar simplificada a taxa de falhas constante ao longo do tempo. O maior detalhamento das informações e do tempo de coleta de dados proporcionará uma análise dos dados mais adequada.

6.2 Comparativo Entre Equipamentos Reparados e Novos

Diversos fatores influenciam a vida útil esperada dos equipamentos. Equipamentos novos apresentam taxa de falha diferentes de equipamentos reparados. Na correta avaliação dos custos envolvidos na aquisição de um equipamento novo devem ser levados em conta todos os seus custos operacionais de manutenção, energia elétrica, instalação e comissionamento, manutenção preventiva, ao longo dos anos de utilização.

6.2.1 Tendência da Taxa de Envelhecimento

De acordo com LAFRAIA (2001) “O envelhecimento de equipamentos é caracterizado por taxa de falha crescente com o tempo. Em princípio, a manutenção preventiva poderia diminuir o crescimento continuado da falha, conforme pode ser visto na figura 39 (LAFRAIA, 2001).

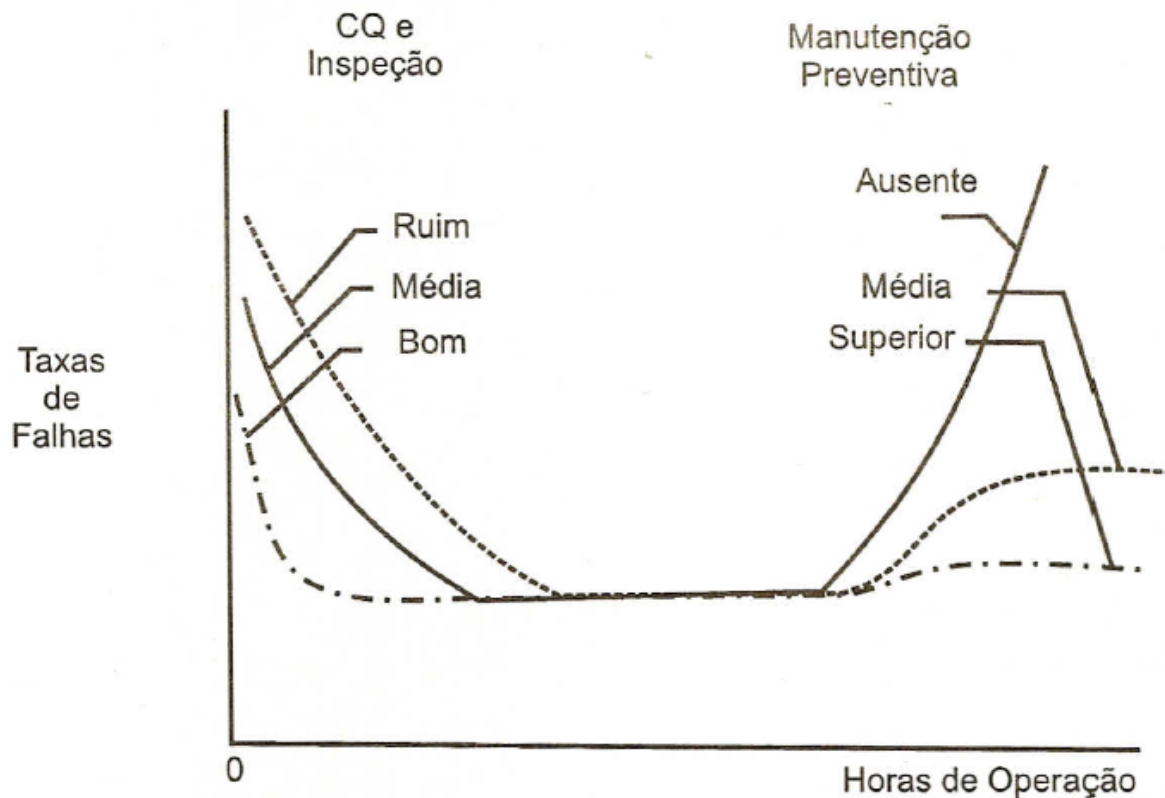


Figura 39 Taxa de falhas dada pela forma da curva da banheira (Fonte: LAFRAIA, 2001).

Pode-se distinguir duas formas extremas de manutenção, além de uma intermediária:

- a) Reparo mínimo.
- b) Substituição.
- c) Reforma.

O reparo mínimo não afeta a evolução da taxa de falha do equipamento. Diz-se que ele está *tão ruim quanto velho* (as bad as old). Já a substituição reduz a taxa de falha ao valor inicial, podendo ela ser executada tanto como medida preventiva, quanto corretiva; o equipamento fica *tão bom quanto novo* (as good as new). A reforma, por sua vez, reduz a taxa de falha a valores intermediários. A figura 40 (LAFRAIA, 2001) apresenta a taxa de falhas $\lambda(t)$ em função do tipo de reparo ao longo do tempo.

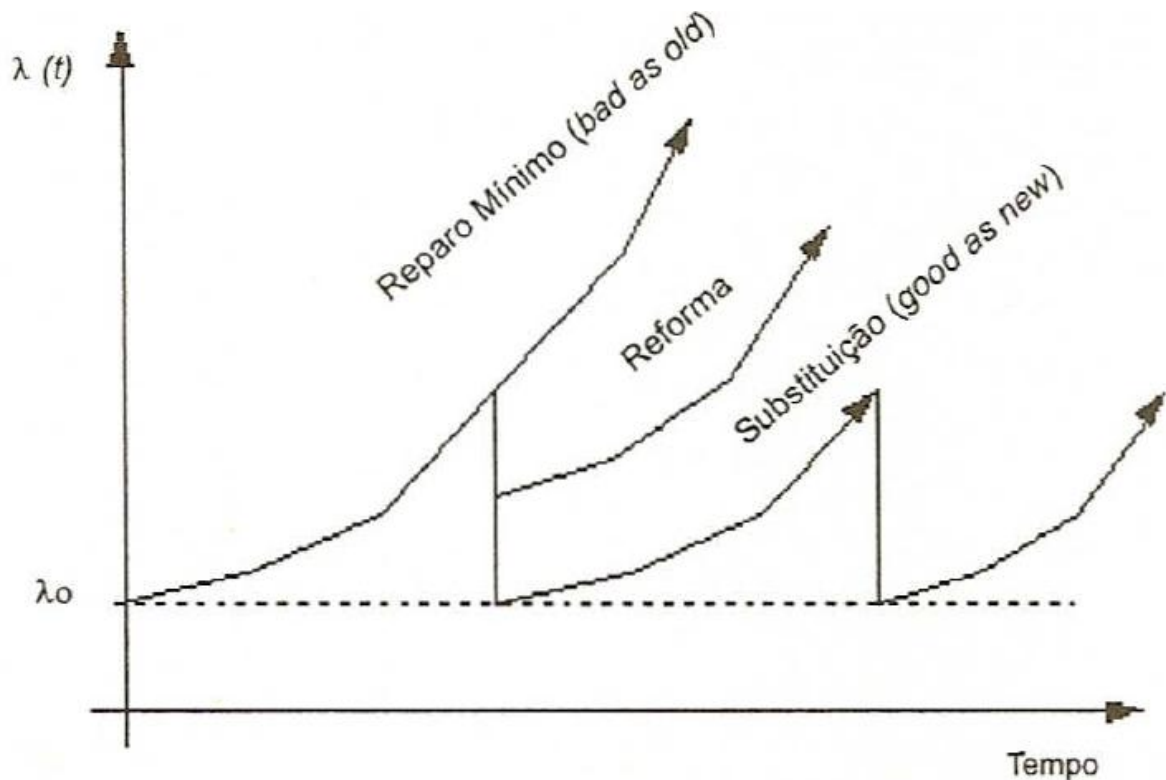


Figura 40 Taxa de falhas em função do tipo de reparo ao longo do tempo (Fonte: LAFRAIA, 2001).

Uma alteração da prática de manutenção pode rejuvenescer o equipamento, invertendo por algum tempo a tendência crescente da taxa de falha. A isso se dá o nome de “crescimento da confiabilidade” (reliability growth). Este fenômeno ocorre, naturalmente, durante a fase da infância de certos equipamentos, também conhecida como *burn-in*, onde a taxa de falha se reduz com o tempo até se estabilizar ou tender a crescer. No caso em que um equipamento ou sistema apresente taxa de falha crescente, quando se pratica manutenção preventiva imperfeita a intervalos de tempo iguais, a taxa de falha apresentará uma tendência crescente. Isto significa que o equipamento ou sistema apresentará maior tendência a falhar à medida que envelhece. Deve-se ressaltar que a existência de manutenção imperfeita é ditada por questões práticas; por exemplo, na primeira manutenção preventiva de um automóvel são substituídos somente aqueles componentes cujas taxas de falha tenham alcançado um nível inadequado. Outros componentes ficarão no

sistema até que as suas taxas de falha atinjam o limite máximo estabelecido, o que, certamente, elevará a taxa de falha do sistema como um todo.

Desejando-se operar até um determinado risco máximo de falha, por exemplo, no caso de equipamentos ou componentes críticos de aviões e centrais nucleares, o período de manutenção preventiva deve ser decrescente para contrabalançar os efeitos da manutenção preventiva imperfeita. Note-se que os períodos de manutenção diminuindo, aumenta-se a frequência de manutenção e, conseqüentemente, o custo de manutenção. Nestes casos, há que se estabelecer um tempo máximo para a substituição para evitar custos de manutenção muito altos ou intervalos de manutenção incompatíveis com questões de produção.”

6.2.2 Avaliação da Vida Residual (AVR)

De acordo com LAFRAIA (2001) “O desenvolvimento das técnicas de avaliação de vida residual (AVR) surgiu da necessidade atual de se estender a vida dos equipamentos industriais além da sua vida de projeto. [...] A solução trivial é a substituição do equipamento quando se atinge a vida de projeto. Esta postura é muito conservativa e cara.

Outra abordagem é a avaliação da vida remanescente em função do histórico operacional real ao longo dos anos e das condições reais dos materiais. Porém, estender a vida além do projeto implica se estudar os riscos envolvidos, que são claramente maiores que os do caso anterior. [...] O desenvolvimento de uma metodologia confiável de avaliação de vida remanescente evita que equipamentos sejam substituídos prematuramente acarretando num grande desperdício de materiais e mão-de-obra, bem como permite a determinação de níveis de segurança e confiabilidade que tornem economicamente viável a operação de instalações industriais.”

6.2.3 Cálculo Econômico

O custo de uma motobomba centrífuga submersível nova pode ser estimado ao longo de 15 anos de funcionamento pela amortização do capital somado ao consumo de energia elétrica, sem considerar os custos de manutenção envolvidos. Esse modelo é muito utilizado em licitações de órgãos públicos de saneamento no Brasil. No quadro 8, mostra-se um modelo de cálculo econômico utilizado pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre (DMAE) para aquisição de motobombas centrífugas em licitações. Considerou-se uma motobomba submersível FLYGT, potência nominal de 18,6kW, rendimento global, hidráulico vezes elétrico, de 69,125%, investimento inicial de capital R\$ 60.000,00, tarifa de energia elétrica de baixa tensão de R\$ 0,36906 por kWh, demais dados extraídos da curva de performance apresentada na figura 9.

CÁLCULO ECONÔMICO - BAIXA TENSÃO	
ITEM	1
Vazão (m3/h)	303
Altura Manométrica Total (mca)	16,8
Potência exigida pela bomba(kW)	17,6
Taxa de Juros	12%
Tempo em Anos	15
Tempo operação diário em Horas	24
Consumo B.T out/2009 (R\$/kWh)	0,36906
Fator de Amortização	0,14682424
Rendimento da Bomba	0,79
Rendimento do Motor	0,88
Rendimento do Conjunto	0,69125
Consumo (R\$)	82.314,93
Capital (R\$)	60.000,00
Amortização	8.809,45
Marca	FLYGT
Modelo	NP3171
Quantidade	1
Total (R\$)	91.124,38

Quadro 8 Cálculo econômico de aquisição de motobomba centrífuga submersível.

O consumo de energia elétrica em Reais R\$ é dado por

$$\text{CONSUMO} = \frac{(\text{POTÊNCIA EXIGIDA PELA BOMBA}(kW)) \frac{365 \text{DIAS}}{\text{ANO}} \frac{24 \text{HORAS}}{\text{DIA}} \frac{\text{R\$ } 0,369}{\text{kWh}}}{(\text{RENDIMENTO DA BOMBA})(\text{RENDIMENTO DO MOTOR})} \quad (46)$$

O fator de amortização do capital a uma taxa de juros t de 12% ao ano, durante número de anos n igual a 15 anos é dado por

$$\text{FATOR} = \frac{t}{1 - \left(\frac{1}{1+t}\right)^n} = 0,146824 \quad (47)$$

A amortização do capital é dada por

$$AMORTIZAÇÃO = (CAPITAL)(FATOR) \quad (48)$$

O total do custo em Reais R\$ ao longo dos anos englobando consumo e capital é dado por

$$TOTAL = AMORTIZAÇÃO + CONSUMO \quad (49)$$

Verifica-se que ao longo de 15 anos o consumo de energia elétrica representa 58% do custo de aquisição da motobomba submersível estudada, gráfico da figura 41, dado comparativo importante na escolha da motobomba submersível a ser adquirida.

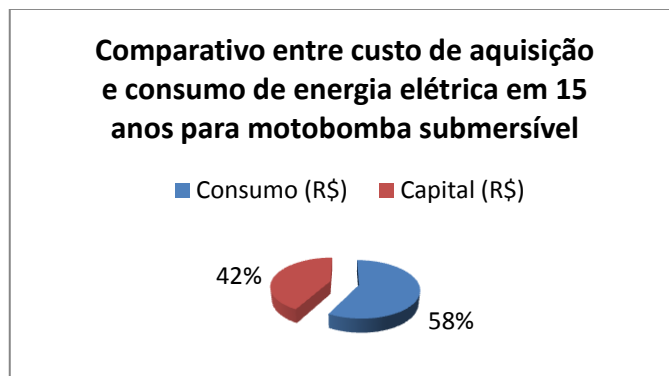


Figura 41 Gráfico comparativo entre custo de aquisição e consumo de motobomba submersível.

6.2.4 Custo do Ciclo de Vida

O custo do ciclo de vida (Life-Cycle Cost-LCC) de um equipamento está diretamente relacionado ao seu custo de aquisição, operação e de manutenção. De acordo com (LAFRAIA,

2001, p. 167) “o custo do ciclo de vida (Life-Cycle Cost-LCC) envolve todos os custos associados com o ciclo de vida do sistema:

1. Custo da Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): custo da análise de viabilidade técnico e econômica, análise do sistema, projeto básico de detalhamento, desenvolvimento do produto, fabricação de protótipos, testes dos protótipos, avaliação inicial, documentação associada.
2. Custo de Produção e Fabricação: custo de fabricação, montagem e teste do sistema de produção, construção da fábrica, aquisição de equipamentos, sobressalentes.
3. Custo de Operação e Manutenção: custo da operação e manutenção do sistema durante a sua vida planejada, incluindo pessoal de manutenção, peças de reposição, equipamentos de suporte e teste, programas de gerenciamento, oficinas, etc.
4. Custo para Disposição no Final da Vida Útil: custo para substituição do sistema e/ou seus componentes devido à obsolescência ou desgaste. Incluídos custos com reciclagem dos materiais ou sua guarda em local adequado.”

O estudo do LCC demonstra que o menor custo do ciclo de vida não costuma corresponder ao equipamento mais barato na fase aquisição, sendo o LCC significativamente afetado pelo investimento do fabricante na fase de projeto do produto.

Conforme ilustrado pela figura 42, segue um exemplo de utilização do Software FLYPS3.1 para avaliação do LCC de uma motobomba submersível FLYGT ao longo de 5 anos de utilização contínua, 24 horas por dia, considerando uma inspeção anual de 1 hora de duração, taxa de juros anual em 12%, taxa de inflação 5%, tarifa de energia elétrica de baixa tensão de \$ 0,23/kWh, custo de aquisição de \$37.500 para a motobomba, \$4.000 para quadro elétrico e acessórios, \$1.200 de serviço de instalação, treinamento e start-up, \$100

para desmobilização, potência nominal do equipamento de 18,6kW, com valores representados em moeda Dólares Americanos (USD).

F24: Life Cycle Cost

Result - LCC calculations		File chart		Bar chart		
Produto	Curva	Nº de bombas	Initial investment cost	Annual cost	Decommissioning cost	LCC - Life Cycle Cost
1.1	NP-3171-181 MT	63435-00-3030	1	4.2700	164545	207320

General settings:

Anos de funcio.: 5 Total interest rate: 7 Currency: USD
 Operation time [hrs/year]: 8760 Taxa de juro: 12 Timerate per manhour: 1
 Energy rate [currency/kWh]: 0,23 Inflation rate: 5

Product/Site settings:

Number of scheduled services/year: 1 Manhours per scheduled service: 1
 Number of unscheduled services/year: 0 Manhours per unscheduled service: 0

Initial costs:

Cic	41500
Price of pump(s)	37500
Pump controls	3000
Pump accessories	1000
Pump station piping, valves etc	0
Other pump station items	0
Force main piping	0
Misc. hardware costs	0
Cin	1200
Installation cost	1000
Commissioning cost	100
Training cost	100

Annual costs:

Ce	40131	164545
Pump based on Pwr cons.	40131	
Auxiliary equipment	0	
Co	0	0
Cm	1	4
Maintenance of pump(s), labour	1	
Maintenance of pump(s), parts and material	0	
Unscheduled service	0	
Aux. Maintenance	0	
Cs	0	0
Cenv	0	0
Decommissioning cost	100	71

Figura 42 Utilização do Software FLYPS3.1 para avaliação do LCC de uma motobomba submersível FLYGT.

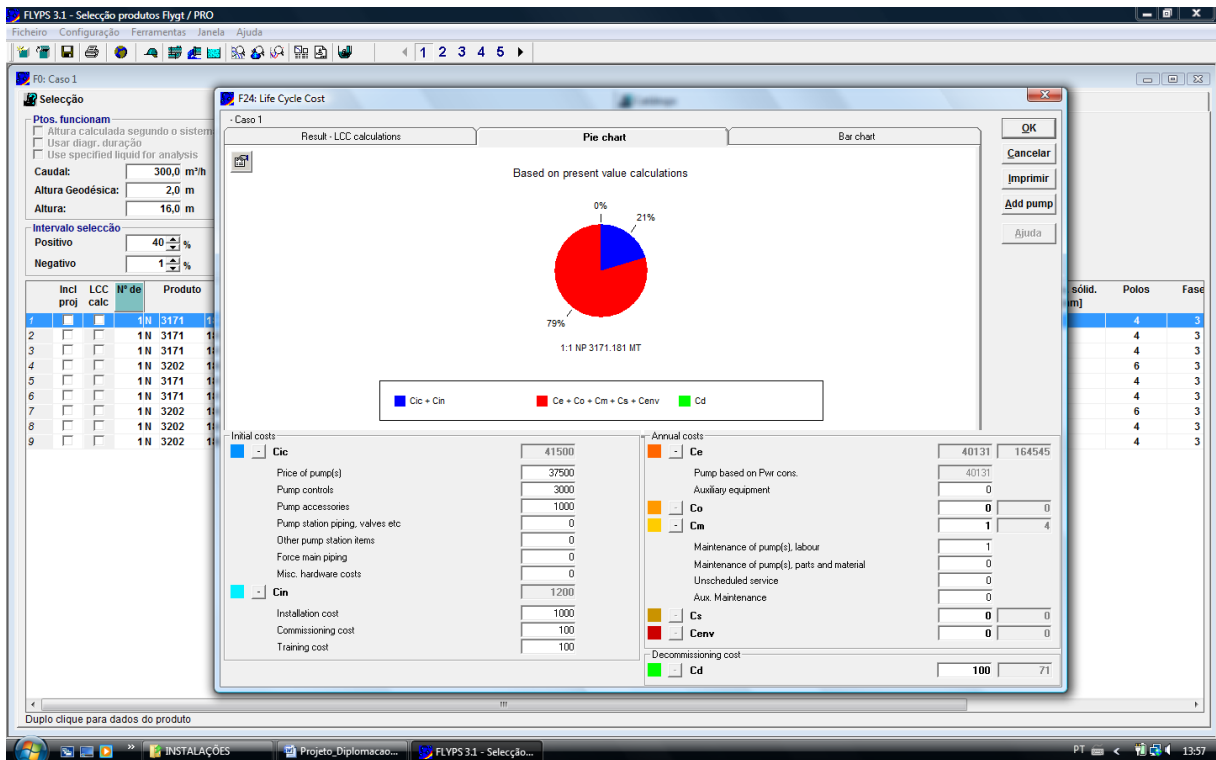


Figura 43 Gráfico da avaliação percentual do LCC de uma motobomba submersível FLYGT.

Verifica-se na figura 43, que o custo de aquisição do equipamento representa somente 21% do custo do ciclo de vida da motobomba ao longo de 5 anos. Logo, verifica-se a importância da escolha por equipamentos de baixa manutenção e consumo de energia elétrica. A figura 44 ilustra um resumo dos resultados da simulação do LCC FLYGT.



Life Cycle Cost



Nome projecto	PROJETO DE DIPLOMAÇÃO UFRGS - Caso	21/04/2011
Cliente		RICARDO REGUS

General settings

Anos de functo.:	5	Operation time [hrs/year]	8 760
Total interest rate	7,00	Energy rate [currency/kWh]	0,23
Timerate per manhour	1	Currency	USD

Product/Site settings

Produto	Number of scheduled services/year	Manhours per scheduled service	Number of unscheduled services/year	Manhours per unscheduled service
1:1 NP 3171.181 MT	1,00	1,0	0,00	0,0

Result - LCC calculations

Produto	Nº de bombas	Initial investment cost	Annual cost	Decommissioning cost	LCC - Life Cycle Cost
1:1 NP 3171.181 MT 63-435-00-3030	1	42 700	164 549	71	207 320

Based on present value calculations

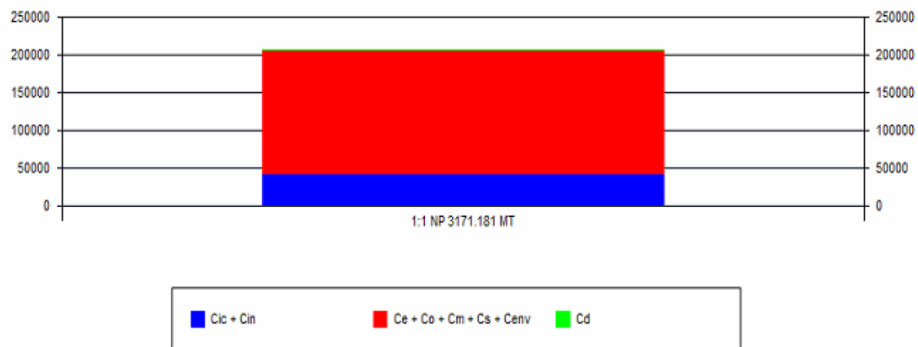


Figura 44 Resumo dos resultados da simulação do LCC FLYGT.

6.2.5 Índice de Reparos

O índice de reparo pode ser resumidamente definido como

$$IR = \frac{\text{custo de reparo}}{\text{custo de substituição por equipamento novo}} \quad (50)$$

Dentro do conceito de durabilidade, segundo apostila de Confiabilidade Aplicada na Manutenção da ABRAMAN publicada em 2010, o custo médio acumulado de manutenção C_m é dado por

$$C_m = B \cdot t^K \quad (51)$$

Onde

B e K são constantes a serem calculadas com base no histórico do equipamento

t é a idade do equipamento em operação

Conhecidos os custos acumulados ao longo do tempo e linearizando-se os dados, aplicando-se o logaritmo natural a ambos os lados da equação, por regressão linear obtém-se os coeficientes B e K. O valor de K geralmente aumenta com a complexidade do equipamento (número de componentes), para K=1 temos equipamentos simples e K>1 equipamentos mais complexos. O custo médio total acumulado de manutenção C_T depende da idade do equipamento e do custo de aquisição do equipamento A, dado por

$$C_T = A + B \cdot t^K \quad (52)$$

O custo total médio por unidade de tempo em operação é dado por

$$C_{Tmed} = \frac{C_T}{t} = \frac{A}{t} + B \cdot t^{K-1} \quad (53)$$

A idade t para o qual o equipamento alcança o seu custo médio acumulado mínimo pode ser chamada como durabilidade do equipamento D . O custo médio acumulado mínimo ocorre quando

$$\frac{dC_{Tmed}}{dt} = 0 \quad (54)$$

$$t = D = \left[\frac{A}{B \cdot (K-1)} \right]^{\frac{1}{K}} \quad (55)$$

O custo médio acumulado mínimo $[C_{Tmed}]_{min}$, excluindo os custos operacionais, é obtido substituindo-se o valor de t , obtido na equação acima

$$[C_{Tmed}]_{min} = \frac{A \cdot K}{K-1} \left[\frac{B \cdot (K-1)}{A} \right]^{\frac{1}{K}} \quad (56)$$

Existe um custo limite de reparo no tempo t que depende do custo médio total acumulado de manutenção em valores presentes menos o custo econômico ótimo de reparação multiplicado pelo tempo de uso t dado por

$$r(t) = A + B \cdot t^K - \frac{A \cdot K \cdot t}{K-1} \left[\frac{B \cdot (K-1)}{A} \right]^{\frac{1}{K}} \quad (57)$$

Se em qualquer instante de tempo t , o custo estimado de reparo é maior que $r(t)$, o item deve ser sucateado. Se em qualquer instante de tempo t , o custo estimado de reparo é menor que $r(t)$, o item deve ser reparado e entrar de novo em serviço.

6.3 Excelência em Manutenção

A busca pela excelência deve ser a meta diária do profissional de manutenção. Existem diversos estudos para melhoria dos processos e aumento da confiabilidade em manutenção, dentre eles são apresentados resumidamente a manutenção centrada na confiabilidade (MCC) e a manutenção produtiva total (MPT).

6.3.1 Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC)

De acordo com FOGLIATTO, RIBEIRO (2009) “A manutenção centrada na confiabilidade (MCC) pode ser definida como um programa que reúne várias técnicas de engenharia para assegurar que os equipamentos de uma planta fabril continuarão realizando as funções especificadas. A eficácia da MCC está baseada em alguns pilares próprios desse programa. Entre esses pilares, podem ser destacados: (i) amplo envolvimento de engenheiros, operadores e técnicos de manutenção, caracterizando um ambiente de engenharia simultânea; (ii) ênfase no estudo das conseqüências das falhas, que direcionam todas as tarefas de manutenção; (iii) abrangência das análises, que consideram questões associadas à segurança, meio ambiente, operação e custos; (iv) ênfase nas atividades pró-ativas, envolvendo tarefas preditivas e preventivas; (v) combate à falhas escondidas, que reduzem a

confiabilidade do sistema. [...] De acordo com MOUBRAY (1997 apud FOGLIATO;RIBEIRO, 2009) existem sete questões básicas que devem ser contempladas pelos programas de MCC:

- (i) Quais as funções e padrões de desempenho esperados para os equipamentos fabris?
- (ii) De que modo os equipamentos podem falhar em cumprir suas funções?
- (iii) O que causa cada falha funcional?
- (iv) O que acontece quando cada falha ocorre?
- (v) De que forma cada falha interessa?
- (vi) O que pode ser feito para prevenir ou impedir cada falha?
- (vii) O que deve ser feito quando não pode ser estabelecida uma atividade pró-ativa pertinente?”

6.3.2 Manutenção Produtiva Total (MPT)

De acordo com FOGLIATTO, RIBEIRO (2009) “A manutenção produtiva total (MPT) surgiu no Japão, onde é considerada como a evolução natural da manutenção corretiva (reativa) para a manutenção preventiva (pró-ativa). A MPT expandiu os conceitos tradicionais da manutenção, incorporando esforços para evitar defeitos de qualidade provocados pelo desgaste e mau funcionamento dos equipamentos. A MPT entende que as pessoas que utilizam o equipamento são aquelas que possuem os maiores conhecimentos referentes a ele. [...] A MPT apóia-se em alguns elementos gerais. Entre esses elementos, vale destacar:

- (i) mudança cultural, visando otimizar o rendimento geral dos equipamentos;
- (ii) estabelecimento de um sistema para prevenir as perdas associadas aos equipamentos e local de trabalho (zero acidente, zero defeito de qualidade, zero quebra);
- (iii) implementação envolvendo todos os departamentos – manutenção, produção, engenharia,

desenvolvimento de produtos, vendas, recursos humanos etc.; (iv) envolvimento de todos os colaboradores em atividades de melhoria contínua (*kaizen*), desde a alta direção até os operadores mais simples; e (v) educação e treinamento, visando aprimorar a consciência e competência dos colaboradores.

Esses elementos gerais, por sua vez, suportam a busca de perda zero, envolvendo ações específicas da manutenção, entre as quais se destacam: (i) atividades de manutenção autônoma conduzidas pela produção; (ii) planejamento das atividades de manutenção, apoiado em procedimentos padronizados próprios para cada equipamento, baseados em tempo de uso ou degradação observada; e (iii) prevenção de quebras já na fase de projeto dos equipamentos, desenvolvendo soluções que facilitem ou eliminem necessidade de manutenção.”

7 ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS

Todo processo de engenharia, seja ele de pesquisa e desenvolvimento, projeto, produção, ou manutenção requer a busca pelo resultado ideal ao mínimo custo.

Analisando os procedimentos de reparos descritos ao longo deste projeto encontra-se alguns problemas de manutenção, operação, tempo, equipamentos e organização.

7.1 O Fator Humano na Manutenção

Os técnicos de manutenção precisam de treinamento e constante acompanhamento de suas tarefas pelo engenheiro de manutenção para garantia de que os procedimentos de reparos estão sendo realizados conforme o padrão recomendado por norma ou pelo fabricante. Cabe ao engenheiro de manutenção fiscalizar, corrigir e evitar os erros rotineiros que ocorrem. Os erros incluem:

a) A falsa segurança do mecânico em não consultar o catálogo técnico das motobombas para efetuar os serviços de desmontagem, montagem e orçamento de acordo com a recomendação do fabricante, acarretando erros de seqüência de montagem e a famosa sobra de peças;

b) A tendência de substituir componentes por intuição ou por opinião de terceiros não qualificados, como por exemplo, vendedores de balcão que tendem a oferecer o que estiver disponível, por exemplo, a troca de um capacitor de partida de uma motobomba monofásica de 30 μ F de fábrica por um de 15 μ F;

c) troca dos números internos de ligação dos condutores das bobinas do estator, ocasionando curtos circuitos e alterações de tensão e correntes nominais;

d) utilização de ferramentas inadequadas para desempenho da função, como por exemplo, a utilização de martelo ou alicate para remoção do crivo, difusores, rotores, rolamentos ou peças emperradas pelo desgaste ou sujeira, quando o correto seria a utilização de duas chaves de fenda diametralmente dispostas na forma de alavancas, ou ferramenta específica como extrator de rolamentos, extrator de rotor, extrator de selo mecânico;

e) ausência de cuidado ao manusear os selos mecânicos pelas faces lapidadas, provocando vazamento pelas faces após a entrada da bomba em operação;

f) instalar os selos mecânicos sem a correta lubrificação e através da força em vez do cuidado necessário, acarretando vazamentos após a entrada em operação e até mesmo a trinca e quebra das faces;

g) incorreta avaliação da real necessidade de substituição de peças consideradas em bom estado, com a conseqüente falha posterior, ou ainda o sucateio de peças que poderiam ser reutilizadas.

7.2 O Fator Humano na Operação

Um problema na operação de motobombas submersíveis de drenagem muito comum em obras de barragens e hidroelétricas se deve ao fato de que o operador muitas vezes sem conhecimentos básicos de eletricidade e manuseio de equipamentos elétricos tende a:

a) deixar a motobomba trabalhando no barro (sem água para drenar), ou com rotor travado por obstrução de algum objeto como pedras e paus, sobreaquecendo o motor;

b) ligar a motobomba na tensão errada ou curto circuitar as fases;

c) ligar a motobomba diretamente a alimentação sem o quadro elétrico de proteção, acarretando a queima direta em caso de sobreaquecimento, sub ou sobretensão e desbalanceamento de fase.

d) içar a motobomba pelo cabo elétrico, quando o correto seria pela alça de içamento com auxílio de corda ou corrente.

Com a utilização de fio esmaltado e verniz de qualidades superiores tipo classe H(180°C) de imersão e secagem em estufa no lugar de classe F (150°C) aumentar-se a vida útil do motor nesses casos extremos de má utilização.

7.3 O Fator Tempo

Nem sempre se consegue devolver a motobomba dentro do prazo esperado pelo cliente. A demora na devolução de motobomba remetida para conserto se deve ao tempo de reparo que varia de 1 a 30 dias dependendo da disponibilidade de peças de reposição. A redução do tempo de parada para manutenção poderia ser obtida por meio de um estoque eficiente de peças usuais de reposição como selos mecânicos, anéis "O" ring, buchas de vedação, rolamentos, cabo elétrico nas bitolas mais utilizadas de 1,5 a 6 mm² e principalmente, estatores rebobinados de potências de 1,5 a 22kW com 12 terminais de ligação para 220/380/440V e 2 terminais para os sensores de proteção, prontos para montagem.

Outro problema também relacionado ao tempo acontece eventualmente com motobombas novas ou reparadas, paradas por mais de 1 ano quando o selo mecânico pode oxidar e travar. Uma solução seria girar com a mão o rotor da bomba uma vez a cada 6 meses parada, assim movimentando e lubrificando as faces do selo.

7.4 O Fator Equipamentos

Para os equipamentos de medição, a utilização de megômetro de menor valor de tensão, por exemplo 500V, acarretaria menores danos ao enrolamento medido que o referido de 2000V.

Para os equipamentos de rebobinagem, o processo de remoção do núcleo do estator é feito manualmente através de choques mecânicos de marreta e calor localizado aplicado por maçarico, esse processo acarreta uma série de esforços mecânicos e tensões localizadas na carcaça causando deformação e estresse da estrutura. Uma solução seria a utilização de distribuição uniforme de calor massivamente em toda a peça evitando os choques mecânicos e esperando o núcleo cair pelo próprio peso.

7.5 O Fator Organização

A desorganização e sujeira da bancada e das ferramentas é fator para erros de montagem.

É comum colocar as caixas com os equipamentos desmontados etiquetados com orçamento aprovado junto com as caixas dos equipamentos aguardando aprovação, quando o correto seria ficarem em locais separados. Para controle de qualidade e garantia, todos os motores e motobombas recuperados deveriam ser marcados e identificados por um nº de série com o tipo de serviço já efetuado, data de realização dos serviços, e ficha de serviço devidamente arquivada inclusive com os resultado de testes de performance, sendo assim mantido um histórico de cada equipamento.

A implantação de certificações ISO 9000 e ISO 14000, treinamento em manutenção centrada na confiabilidade (MCC) e a manutenção produtiva total (MPT), aliados a programas como o 5S - senso de utilização; senso de ordenação; senso de limpeza; senso de saúde; e senso de autodisciplina; resulta em benéficos resultados ao processo produtivo, ao ambiente de trabalho, as pessoas e ao meio ambiente. Importante também, evitar-se desperdícios de materiais, seja feita a correta disposição e seleção de resíduos sólidos e líquidos utilizados no serviço de manutenção, tratamento de efluentes da empresa e reuso de água dos processos.

8 CONCLUSÃO

O presente Projeto de Diplomação procurou agrupar o conhecimento da teoria de motobombas centrífugas, identificação de falhas, técnicas de reparo, custos e confiabilidade envolvidos no processo de manutenção. Com a realização deste projeto, objetivou-se aprimorar e padronizar o serviço de manutenção de motobombas submersíveis buscando a redução de custos, de tempo e a satisfação de clientes e diretores. Verificou-se que a manutenção é uma grande balança onde deve-se pesar o custo da prevenção e o custo da aceitação da quebra e conseqüente posterior reparo. Nitidamente, os equipamentos de maior custo de aquisição e de menor custo do ciclo de vida, tem reconhecida qualidade, robustez, confiabilidade e melhor manutenibilidade sendo a melhor escolha para o profissional de manutenção gerir. Logo, cabe a capacitação de profissionais e investimento das empresas em serviços e equipamentos que garantam maior vida útil, menor consumo, custos operacionais e a preservação do meio ambiente.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS. Máquinas Elétricas. 6ª edição. Capítulo 6: Máquinas Polifásicas de Indução. Porto Alegre: Bookman, 2006. 295p.

FLUENT. Software de análise computacional de fluido dinâmica. Apresenta informações e estudos de caso relacionados a utilização do software. Disponível em: <[HTTP://www.fluent.com/solutions/examples/x197.htm](http://www.fluent.com/solutions/examples/x197.htm)>. Acesso em: 20 de dezembro 2010.

FOGLIATTO; RIBEIRO. Confiabilidade e Manutenção Industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 265p.

IMPELLER MAGAZINE. Revista eletrônica com informações de motobombas de grandes fabricantes mundiais. Apresenta diversos estudos de caso de fabricantes pelo mundo e lançamentos do setor de bombeamento. Disponível em: <[HTTP:// impeller.net/magazine/news_en/doc4585x.asp](http://impeller.net/magazine/news_en/doc4585x.asp)>. Acesso em: 20 de dezembro 2010.

FLYGT. Bombas submersíveis e misturadores. Apresenta informações sobre motobombas submersíveis e misturadores. Disponível em: <[HTTP://int.flygt.com](http://int.flygt.com)>. Acesso em: 15 de novembro 2010.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. 1ª edição. 2ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 374p.

LOUREIRO, Luiz Tiarajú. Notas de aula do Professor da UFRGS semestre letivo 2009/2.

LOWARA. Motobombas centrífugas em aço inox. Apresenta informações sobre diversos modelos de motobombas centrífugas em aço inox. Disponível em: <[HTTP:// www.lowara.com](http://www.lowara.com)>. Acesso em: 15 de novembro 2010.

MACINTYRE, Archibald J. . Bombas e Instalações de Bombeamento. 2ª edição Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 782p.

NEMA Standards Publication No. MG 1-1998, Revision 1: Motors and Generators.

NBR 5383-1 – 2002 – Máquinas Elétricas Girantes – Parte 1: Motores de Indução Trifásicos.

NBR 5410-2004 – Instalações elétricas de baixa tensão.

NBR 5462 – 1994 – Confiabilidade e Manutenibilidade.

Operações Unitárias Engenharia Química UFRN. Bombas centrífugas conceitos básicos de operação e manutenção. Disponível em: <[HTTP://www.ufrnet.br/~lair/Pagina-OPUNIT/bombascentrifugas-1.htm](http://www.ufrnet.br/~lair/Pagina-OPUNIT/bombascentrifugas-1.htm)>. Acesso em: 16 de janeiro 2011.

PORTOBOMBAS. Motobombas centrífugas e submersíveis. Apresenta informações sobre motobombas centrífugas em geral. Disponível em: <[HTTP://www.portobombas.com.br](http://www.portobombas.com.br)>. Acesso em: 30 de outubro 2010.

PUCRS. Programa 5S da Pontifícia Universidade do Rio Grande do Sul (PUCRS). Disponível em: <<http://www.pucrs.br/feng/5s/>>. Acesso em: 22 de abril 2011.

RIC CEEE – Regulamento de Instalações Consumidoras, Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE). Junho 2008.

SEIXAS, Eduardo de Santana. Apostila de Confiabilidade Aplicada na Manutenção. LATEC, Universidade Federal Fluminense. ABRAMAN, 2010. 201p.

WEG. Danos em enrolamentos: Motores trifásicos.

WIKIPEDIA. Enciclopédia livre na internet. Apresenta os mais variados conteúdos e informações a respeito do conhecimento humano com muitas referências. Pesquisa feita a respeito de EULER. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Leonhard_Euler>. Acesso em: 19 de janeiro 2011.

WIKIPEDIA. Enciclopédia livre na internet. Apresenta os mais variados conteúdos e informações a respeito do conhecimento humano com muitas referências. Pesquisa feita a respeito de BERNOULLI. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli>. Acesso em: 19 de janeiro 2011.