

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CINTHIA APARECIDA DE LIMA

ANÁLISE DA CAVITAÇÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS E SEUS IMPACTOS
SOBRE A EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA

CURITIBA

2015

CINTHIA APARECIDA DE LIMA

ANÁLISE DA CAVITAÇÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS E SEUS IMPACTOS
SOBRE A EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Área de Concentração em Engenharia Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. José Junji Ota

CURITIBA

2015

Lima, Cinthia Aparecida de
Análise da cavitação em bombas centrífugas e seus impactos
sobre eficiência hidroenergética / Cinthia Aparecida de Lima. –
Curitiba, 2016.
112 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor
de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Daniel Costa dos Santos

Coorientador: José Junji Ota

Bibliografia: p. 102-109

1. Cavitação. 2. Bombas centrífugas. 3. Indicadores. I. Santos,
Daniel Costa dos. II. Ota, José Junji. III. Título.

CDD 628



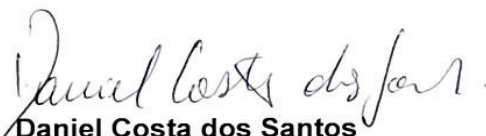
TERMO DE APROVAÇÃO

CINTHIA APARECIDA DE LIMA

“Análise da cavitação em bombas centrífugas e a influência sobre a eficiência hidroenergética”

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:

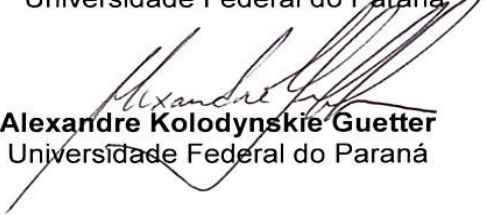

Daniel Costa dos Santos
Universidade Federal do Paraná
Orientador

MEMBROS:


José Junji Ota
Universidade Federal do Paraná
Co-Orientador


Gustavo Rafael Collere Possetti
Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR


Sérgio Michélotto Braga -
Universidade Federal do Paraná


Alexandre Kolodynskie Guetter
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 18 de dezembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo apoio recebido por meu pai, minha mãe, irmãs e sobrinhas. Obrigada Milton e Sônia pelo amor, carinho, compreensão, auxílio nas horas difíceis, paciência e exemplo de perseverança.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos, por sua orientação, amizade, conselhos e pela confiança em mim.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. José Junji Ota por suas preciosas dicas, orientação e exemplo de humildade. (Sou sua fã).

Ao amigo, Prof. Dr. Sérgio Michelotto Braga, por todas as conversas, conselhos (você é como um segundo pai para mim).

Aos grandes amigos que aqui conquistei Andressa, Priscila, Ricardo, Tábata, Cesar, Mayra, Adelita, Anderson, Ana Paula, Ju Rizzi, Vinicius, Júlio, Pedro, Roby, Luiza, João, Gabriela, Artur, Jhonatas, Juliana, Steffany, Mizu, Erika, Orlando, Ellen, Lívia, Felipe, Leandro e a todos que participaram da minha vida durante o mestrado. Obrigada por todos os bons momentos, e pelo ombro amigo nas épocas difíceis.

Aos meus amigos pela paciência e por perdoarem minhas ausências.

A Deus, por ter aberto meus caminhos e permitido que aqui eu chegasse.

Aos professores do PPGERHA pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários do PPGERHA, DHS, CEHPAR pela colaboração.

À Sanepar e à ELETROBRAS, pelo inventivo à pesquisa e pelo apoio financeiro. Em especial ao Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti por toda contribuição a minha pesquisa.

Aos alunos de iniciação científica que me auxiliaram no LENHS. Obrigada Jean, Juliana, Gabriela, Jamilly, Natália e Daiane, vocês foram essenciais para o desenvolvimento dos meus ensaios.

“Cada pessoa é aquilo que crê; fala do que gosta;
retém o que procura; ensina o que aprende;
tem o que dá e vale o que faz.”

Francisco Cândido Xavier

SUMÁRIO

RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE TABELAS.....	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XX
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 ENERGIA E ÁGUA.....	4
3.2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	10
3.2.1 ORIGENS.....	10
3.2.2 CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (SAA).....	13
3.3 SISTEMAS ELEVATÓRIOS.....	16
3.3.1 APRESENTAÇÃO.....	16
3.3.2 TIPOS DE BOMBAS.....	18
3.4 ASSOCIAÇÃO ENTRE BOMBAS.....	20
3.4.1 ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE.....	20
3.4.2 ASSOCIAÇÃO EM PARALELO.....	21
3.5 MOTORES ELÉTRICOS.....	22
3.6 VARIÁVEIS DE DIMENSIONAMENTO.....	23
3.6.1 ALTURA MANOMÉTRICA (H).....	23
3.6.2 POTÊNCIA HIDRÁULICA.....	24
3.6.3 RENDIMENTO DO CONJUNTO MOTOBOMBA (H).....	24
3.6.4 <i>NET POSITIVE SUCTION HEAD (NPSH)</i>	25
3.7 CAVITAÇÃO.....	32
3.7.1 DEFINIÇÃO.....	32
3.7.2 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO.....	33
3.7.3 EVOLUÇÃO DA CAVITAÇÃO.....	34
3.7.4 INTENSIDADE DE CAVITAÇÃO.....	36

3.7.5	DANOS POR CAVITAÇÃO	37
3.8	CRITÉRIOS TEÓRICOS.....	39
3.8.1	ÍNDICE DE CAVITAÇÃO INCIPIENTE OU SIGMA CRÍTICO (Σ_c)	39
3.8.2	NÚMERO DE THOMA (Σ)	41
3.8.3	VELOCIDADE ESPECÍFICA (N_Q) E ROTAÇÃO ESPECÍFICA (N_S)	41
3.8.4	AVALIAÇÃO DOS NPSH'S E DA CAVITAÇÃO COM A VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO	42
3.9	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	43
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
4.1	ORGANIZAÇÃO DO LENHS/UFPR.....	49
4.2	ENSAIOS PRELIMINARES.....	50
4.3	TIPOS DE CONFIGURAÇÕES	51
4.3.1	CONFIGURAÇÃO 1.....	51
4.3.2	CONFIGURAÇÃO 2.....	52
4.3.3	CONFIGURAÇÃO 3.....	53
4.3.4	CONFIGURAÇÃO 4.....	55
4.4	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO PARA O NPSH _R	56
4.4.1	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO PARA O ÍNDICE DE CAVITAÇÃO INCIPIENTE (Σ_c)	58
4.4.2	METODOLOGIA UTILIZADA PARA O CÁLCULO NUMÉRICO	58
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
5.1	RESULTADOS PARA A ANÁLISE DOS CRITÉRIOS DE NPSH _R	61
5.2	RESULTADOS PARA A ANÁLISE DOS CRITÉRIOS DE SIGMA CRÍTICO (Σ_c)	66
5.3	ANÁLISE PARA AS CONFIGURAÇÕES 3 E 4	70
5.4	ANÁLISE PARA A CONFIGURAÇÃO 1	70
5.5	ANÁLISE PARA A CONFIGURAÇÃO 2	80
5.6	COMPARAÇÃO ENTRE A CONFIGURAÇÃO 1 E CONFIGURAÇÃO 2	88
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
	REFERÊNCIAS.....	102
	APÊNDICE.....	110

RESUMO

As empresas de saneamento estão entre os maiores consumidores de energia elétrica no mundo. Em termos gerais, 90% do seu consumo energético são direcionados ao funcionamento dos conjuntos motobomba. Esse trabalho analisou critérios que atestem a ocorrência de cavitação, por meio da indução do fenômeno a um sistema. Utilizaram-se bombas centrífugas em diferentes tipos de associação, variando-se suas velocidades de rotação. Assim, analisaram-se parâmetros de *Net Positive Suction Head* (NPSH), número de Thoma, índice de cavitação incipiente, entre outros. Além de propostas para o cálculo aproximado do NPSH requerido, quando este não for conhecido. A comparação entre as situações de operação normal e de indução de cavitação dos conjuntos motobomba, resultou em impactos significativos sobre o rendimento do conjunto, uma queda na eficiência de 21,4% para conjunto motobomba simples e 21,6% para conjuntos motobomba em série.

Palavras-chave: cavitação, NPSH, eficiência, indicadores, rendimento.

ABSTRACT

Sanitation companies are among the largest consumers of electricity in the world. Overall, 90% of its energy consumption is directed to the operation of pumping sets. This study analyzed the criteria attesting the occurrence of cavitation, through the phenomenon induction to a system. There were used centrifugal pumps in different association types, varying their speed. Thus, were analyzed the parameters Net Positive Suction Head for (NPSH and Thoma number of incipient cavitation index), among others, in addition to the proposals for the approximate calculation of the required NPSH when it is not known. The comparison between the situations of normal operation and the motor pump sets cavitation induction resulted in significant impacts on the sets income, a drop in efficiency from 21.4% to set simple pump and 21.6% for pump sets in series.

Key-words: cavitation, NPSH, rotation, indicators, efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico da participação das matrizes energéticas brasileiras nos anos de 2013 e 2014	7
Figura 2 - Sistema de abastecimento de água no período colonial, Fonte Grande - BA	10
Figura 3 - Fotografia do primeiro chafariz da cidade de Curitiba, localizado no Largo Zacarias.....	11
Figura 4 – Diagrama esquemático de um SAA.	14
Figura 5 – Diagrama esquemático de uma casa de bombas.	17
Figura 6 - Diagrama esquemático de bomba de êmbolo.....	19
Figura 7 - Representação de uma bomba centrífuga em corte.	20
Figura 8 - Desenho esquemático de um exemplo de associação de bombas em série.	21
Figura 9 - Desenho de uma associação de bombas em paralelo.....	22
Figura 10 - Figura representativa de um motor de indução.....	23
Figura 11 - Exemplos dos tipos de sucção, à esquerda esquema de sucção positiva e à direita, representação esquemática de sucção negativa.....	26
Figura 12 – Representação esquemática das energias envolvidas na região da sucção da bomba	27
Figura 13 - Circuito de teste fechado para determinação de NPSHr de uma bomba.	29
Figura 14 - Gráfico para estimativa de NPSHr para bombas com rotação de 1760 rpm.	31
Figura 15 - Gráfico para estimativa de NPSHr para bombas com rotação de 3500 rpm	31
Figura 16 - Diagrama de fases da água	33
Figura 17 - Etapas de formação da cavitação por um estrangulamento.	33

Figura 18 - Comportamento das pressões no desenvolvimento das bolhas de ar em condições de cavitação	34
Figura 19 - Fases da evolução do fenômeno de cavitação.....	35
Figura 20 - Corrosão causada pela ação da cavitação em carcaça de bomba centrífuga de ferro fundido	38
Figura 21 – Erosão causada pela ação da cavitação em carcaça de bomba centrífuga de ferro fundido.	39
Figura 22 - Consumo de energia por classe, dados da EPE referentes ao ano de 2013.	44
Figura 23 - Diagrama simplificado do balanço de energia em um SAA.	46
Figura 24 – Desenho esquemático para a configuração 1.....	52
Figura 25 – Desenho esquemático para a configuração 2 (Fonte: Autor, 2014).	53
Figura 26 – Fotografia do arranjo experimental utilizado no LENHS/UFPR para as configurações 1 e 2.....	53
Figura 27 – Desenho esquemático para a configuração 3	54
Figura 28 – Fotografia do arranjo utilizado no LENHS/UFPR para a Configuração 3.	54
Figura 29 – Desenho esquemático da instalação utilizada para a configuração 4 ...	55
Figura 30 – Fotografia do arranjo utilizado no LENHS/UFPR para a configuração 4.	55
Figura 31 – Gráfico de estimativa de NPSHr x frequência com NPSHr Fornecedor (1).....	61
Figura 32 – Gráfico de estimativa de NPSHr x frequência para as características nominais aplicado a equação de Yedidah (1996), 3500 rpm.	62
Figura 33 – Gráfico de estimativa NPSHr x rotação para 03 bombas selecionadas, vazão fixa (20 m ³ /h) e rotação variada	62
Figura 34 – Gráfico de estimativa de NPSHr x altura de elevação, rotação (3500 rpm) e vazão fixa (10 m ³ /h).	63

Figura 35 – Gráfico de estimativa de NPSH _r x altura de elevação, rotações variadas e vazão fixa (10 m ³ /h).....	64
Figura 36 – Gráfico sobre o comportamento dos sigmas críticos com a variação da rotação	67
Figura 37 – Gráfico de comparação entre os sigmas críticos com a vazão variável. 68	
Figura 38 - Gráficos de sigmas críticos e média dos sigmas.	69
Figura 39 – Gráfico NPSH _d x NPSH _r com a variação da frequência, em condição normal de operação para a configuração 1.....	73
Figura 40 – Gráfico NPSH _d x NPSH _r com a variação da frequência, em condição de cavitação para a configuração 1.....	73
Figura 41 – Gráfico sobre o comportamento do número de Thoma e sigma crítico com a variação da rotação em situação de indução de cavitação para a configuração 1.	74
Figura 42 – Gráfico dos Rendimentos em ambas as situações com a variação da frequência de rotação para a configuração 1.	76
Figura 43 - Limites inferior e superior da vazão de cavitação.	78
Figura 44 - Comparação entre os indicadores CEN em situação normal e de cavitação.	80
Figura 45 – Gráfico NPSH _d x NPSH _r em condição normal de operação para a configuração 2.....	81
Figura 46 – Gráfico NPSH _d x NPSH _r com a variação da frequência, em condição de cavitação para a configuração 2.....	83
Figura 47 – Comportamento dos rendimentos com a variação da frequência de rotação para a configuração 2.....	85
Figura 48 – Limites inferior e superior da vazão de cavitação.....	86
Figura 49 - Comparação entre os indicadores CEN em situação normal e de cavitação.	88
Figura 50 - Comparação entre as vazões apresentadas em ambas às configurações em situação normal e de cavitação	89

Figura 51 - Comparação entre rendimentos entre as configurações 1 e 2 em situação normal e de cavitação	91
Figura 52 - Comparação entre as configurações 1 e 2 para os indicadores energéticos em situação normal.....	91
Figura 53 - Comparação entre as configurações 1 e 2 para o CE em situação de cavitação	92
Figura 54 - Comparação entre as configurações 1 e 2 para o CEN em situação normal.	93
Figura 55 - Comparação entre as configurações 1 e 2 para o CEN em situação de cavitação	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre fonte e a "pegada hídrica" correspondente	6
Tabela 2 - Índice de atendimento de abastecimento de água e tratamento de esgoto.	13
Tabela 3 - Tipos de configurações	51
Tabela 4 – Critérios para análise de NPSHr pela bomba.....	57
Tabela 5 – Número de dados trabalhados para os diferentes tipos de ensaio e configurações.....	59
Tabela 6 – Equivalência entre o percentual de frequência e a rotação do motor (3500 rpm) utilizado nas configurações 1 e 2.....	59
Tabela 7 – Equivalência entre o percentual de frequência e a rotação do motor (1750 rpm) utilizado nas configurações 3 e 4.....	59
Tabela 8 – Comparação entre os resultado de NPSH requerido e análise do erro quadrático representado por cada equação.....	65
Tabela 9 – Comparação entre os sigmas críticos com variação da rotação.	66
Tabela 10 – Comparação entre sigmas críticos para diferentes vazões.	68
Tabela 11 - Equações e critérios adotados.....	70
Tabela 12 – Dados médios obtidos para a configuração 1 em condição normal de operação	71
Tabela 13 – Dados médios obtidos para a configuração 1 em condição de operação com indução de cavitação.....	72
Tabela 14 – Rendimentos, Potências Elétricas e Hídricas para ambas as condições da configuração 1	75
Tabela 15 - Resultados obtidos para o consumo específico de energia elétrica (CE) em situação "normal" e de "cavitação" para a configuração 1.	77
Tabela 16 - Resultados obtidos para o indicador GEN aplicado a configuração 1 em situação normal e de cavitação.....	79

Tabela 17 – Dados médios obtidos para a configuração 2 em condição normal de operação.	81
Tabela 18 – Dados médios obtidos para a Configuração 2 em condição de operação com indução à cavitação	82
Tabela 19 – Rendimentos, potências elétricas e hidráulicas de ambas as condições da configuração 2.....	84
Tabela 20 - Resultados para o CE em situação "normal" e de "cavitação" para a configuração 2.....	85
Tabela 21 - Resultados obtidos para o indicador CEN aplicado a configuração 2 em situação normal e de cavitação.	87
Tabela 22 - Comparação de NPSH's entre as configurações 1 e 2 para as situações normal e de cavitação.	90

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BTU	<i>British Thermal Unit</i>
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Excel	Programa utilizado para cálculos matemáticos
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética em Hidráulica e Saneamento
NBR	Sigla utilizada para norma aprovada pela ABNT
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
rpm	Rotações por minuto
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
Sanepar	Companhia de Saneamento do Paraná
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento
UFPR	Universidade Federal do Paraná

UNESCO

*United Nations Educational, Scientific and Cultural
Organization* – Organização das Nações Unidas para a Educação,
Ciência e Cultura

LISTA DE SÍMBOLOS

n_1	Rotação plena
n_i	Rotação para a faixa analisada i
$NPSH_d$	Energia fornecida pelo líquido disponível para a bomba
$NPSH_r$	Energia requerida pela bomba
$NPSH_{rni}$	Energia requerida pela bomba para a rotação analisada
$NPSH_{rn1}$	Energia requerida pela bomba para a rotação plena
N_q	Velocidade específica
N_s	Rotação específica
p_a	Pressão atmosférica
P_e	Potência elétrica
P_H	Potência hidráulica
$p_{sucção}$	Pressão de sucção
η_1	Rendimento para a rotação plena
η_i	Rendimento para a rotação i
Pot_e	Potência elétrica mensurada pelo analisador de energia
σ_c	Índice de cavitação incipiente ou sigma crítico
g	Aceleração da gravidade
H	Altura manométrica
n	Rotação
p	Pressão absoluta
Q	Vazão
V	Velocidade média do escoamento
Z	Cota em relação a um plano de referência
γ	Peso específico do líquido
η	Rendimento do conjunto motobomba

σ

Número de Thoma

ρ

Massa específica do líquido

1. INTRODUÇÃO

A maior parte da água existente no planeta é salgada, correspondendo a cerca de 97,5% do total e apenas 2,5% do total são constituídos por água doce. A baixa oferta deste recurso tem sido ainda mais comprometida por um crescimento populacional elevado no último século, acarretando uma demanda exponencial desprovida de uso racional e também muito afetada por despejos irregulares de efluentes não tratados. A poluição hídrica é oriunda de despejos de esgotos industriais, esgotos domésticos e, também, por poluição difusa. A pouca taxa de atendimento das redes coletoras e estações de tratamento de esgoto, implicam no lançamento de efluente diretamente no solo das vizinhanças ou nos cursos d'água mais próximos. Mares, rios, lagos e outras fontes de recursos hídricos estão em processo de degradação, contendo altos índices de substâncias orgânicas e inorgânicas prejudiciais à saúde humana e ao bioma.

Adicionalmente, o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico estão contribuindo para demandas por volumes de água cada vez maiores, necessitando assim de novas fontes. Porém a escassez dos recursos hídricos aponta a necessidade de adoção de medidas de conservação de água, tais como: redução de vazamentos, sensibilização da população quanto à economia de água, entre outros.

Dessa forma, está tornando-se cada vez mais comum a captação da água bruta em mananciais distantes dos grandes centros urbanos, ocasionando em maior investimento no sistema de abastecimento de água. Seja pela distância e/ou desníveis a serem transpostos, faz-se necessário o uso de estações elevatórias maiores, aumentando-se assim os custos, principalmente com energia elétrica.

Os sistemas de bombeamento são os maiores consumidores de energia em um sistema de abastecimento de água, contribuindo significativamente com os expressivos gastos energéticos das companhias de saneamento. A correta operação e manutenção dessas unidades são primordiais para uma melhor eficiência em termos de atendimento e economia de energia elétrica.

Priorizando pelo bom funcionamento de seus sistemas elevatórios, as companhias de saneamento apontam o fenômeno de cavitação como uma ocorrência indesejável. Até o momento, por causar danos às estruturas das bombas,

necessitando assim, de manutenções dispendiosas e constantes. Entretanto, há dúvidas quanto aos reais impactos da cavitação sobre um sistema. Nesse sentido, pergunta-se seria a cavitação prejudicial apenas a integridade física de uma bomba?

Os estudos sobre cavitação em sistemas elevatórios ainda são incipientes. Assim, não há como avançar nessa importante questão sem que houvesse uma contribuição experimental. A dúvida foi levada ao laboratório para análise minuciosa, do que aconteceria com os principais parâmetros, devidamente controlados, em um sistema de abastecimento: pressão e vazão. Contudo, os parâmetros NPSH disponível e requerido, são diretamente influenciados por vazão e pressão e, exercendo sua influência sobre os parâmetros de cavitação: número de Thoma e índice de cavitação incipiente.

No entanto, analisar o fenômeno somente para a plena rotação do conjunto motobomba, despertou o interesse para o comportamento de tais parâmetros, com a variação da velocidade de rotação. Então, com o intuito de avaliar o desenvolvimento do fenômeno da cavitação e sua tendência, diferentes velocidades de rotação foram impostas aos conjuntos experimentados.

Logo, buscou-se responder: qual seria o impacto, comportamento, efeitos da cavitação se houvesse associações entre conjuntos motobomba? A partir dessa outra dúvida, o estudo em questão foi ampliado para diferentes tipos de associações. Contudo, todas as questões aqui apresentadas por si só, não respondem a dúvida inicial. A cavitação prejudica somente a integridade física de uma bomba? Não.

Por isso, neste trabalho é também avaliada a questão da eficiência energética, a qual será abordada, principalmente com a verificação dos rendimentos dos conjuntos, com posterior análise por meio de indicadores hidroenergéticos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho objetiva propor critérios teóricos e práticos que possibilitem a identificação da ocorrência de cavitação em bombas centrífugas de sistemas elevatórios de água com o intuito de avaliar seus desempenhos hidroenergéticos.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos almejados por este trabalho são:

- Estudar critérios de ocorrência de cavitação em diferentes tipos de associações de bombas;
- Analisar diferentes equações para a obtenção dos parâmetros necessários a cada critério;
- Propor um método simplificado para a estimativa de NPSH requerido, quando ele for desconhecido;
- Avaliar os impactos da cavitação sobre o NPSH disponível e requerido;
- Avaliar o desempenho hidroenergético dos conjuntos motobomba por meio de indicadores específicos;
- Propor um conjunto de diretrizes que possibilite indicar a ocorrência de cavitação, assim como os efeitos deste sobre o desempenho do sistema elevatório;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Energia e Água

Água e energia estão vinculadas e em termos absolutos a energia não é inexistente a nível mundial. O uso total anual mundial de energia comercial é da ordem de 400 quatrilhões de BTUs (Quads). É sabido que o sol irradia sobre a atmosfera da Terra cerca de 6 milhões Quads de energia a cada ano. Entretanto, o que está em escassez é a energia de baixo custo, a energia a qual as pessoas possam ter condições financeiras para sua aquisição. Exatamente o mesmo pode ser dito sobre a água. A água em termos absolutos não é inexistente, porém sua escassez é maior a cada dia. A Terra é um planeta rico em água, o consumo humano e animal anual são muito inferiores a 1% da reserva total de água do mundo. Porém, o que está em falta é água potável e com preço acessível à população (HOFFMAN, 2010).

A água de boa qualidade é, portanto, um recurso finito e necessário para a vida e suas características físicas restringem o seu uso. Segundo Plappally e Lienhardt V (2013) a água em forma de vapor, é o terceiro gás mais abundante na atmosfera, estando atrás somente de nitrogênio e oxigênio, respectivamente. No estado líquido, a água possui elevado calor latente de vaporização, que representa um alto custo de energia para sua destilação. A água é considerada um solvente universal, portanto, dissolve e absorve numerosos materiais com os quais entre em contato. Esta propriedade lhe confere um alto custo para seu tratamento com fins de abastecimento público, devido aos variados processos e produtos necessários para a sua potabilização.

O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico estão levando a uma demanda cada vez maior de novas fontes de água. Ao longo da última metade do século a demanda mundial de água mais que triplicou. Em termos globais, o maior consumidor de água doce é a agricultura. As perspectivas futuras não são animadoras. A retirada global de água em 2000 foi estimada em 4.000 km³, cerca de 30% da oferta total de água doce acessível do mundo. Em 2025 a fração pode chegar a 70% (HOFFMAN, 2010).

A demanda por abastecimento de água cresce anualmente, bem como a demanda por energia elétrica. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS, 2014) no período entre 2012 e 2013, houve um acréscimo de 1,4 milhão de ligações no Brasil, o que significa em termos percentuais um crescimento de 3,0%. Quanto aos volumes, verifica-se um aumento de 255,4 milhões de metros cúbicos na produção de água (1,6%) e 264,9 milhões de metros cúbicos no volume de água consumido (2,7%). Em termos de população total atendida, estima-se um aumento de 4,4 milhões de habitantes, correspondendo a 2,9% de acréscimo na população atendida.

Quanto à geração de energia, as de origem térmica e hidráulica representam consecutivamente 80% e 15% da produção de energia global, requisitando geralmente grandes volumes de água. Reciprocamente, a energia elétrica é necessária para a captação tratamento e distribuição de água (UNESCO, 2015).

Normalmente, os custos com eletricidade estão entre 5% e 30% dos custos totais dos serviços públicos dos tratamentos de água e esgoto no mundo todo (WORLD BANK, 2012). Em países em desenvolvimento esse percentual pode ser ainda maior, traduzindo-se em custos operacionais insustentáveis os quais afetam diretamente a saúde financeira das instituições responsáveis por tais serviços, gerando pressões políticas e encarecendo as tarifas para seus clientes finais.

Segundo Byars e Antizar-Ladislao (2011) grande parte das falhas nos projetos de abastecimento de água são atribuídos à falta, ou ao fraco envolvimento do setor privado. Em seu trabalho sobre tratamento de água e abastecimento na África Sub-Saariana observou-se que as tecnologias de telefonia móvel garantem um bom serviço aos seus usuários, enquanto as tecnologias para sistemas de abastecimento de água estão claramente falhando. A resposta essencialmente baseia-se em uma das filosofias fundamentais do mercado, a oferta é totalmente dependente da demanda. Em alguns países em desenvolvimento, muitas populações ainda não demonstram uma compreensão clara sobre a importância do acesso a água potável. Neste ponto em específico, o Brasil possui realidades discrepantes, em que há regiões com quase 99% de atendimento à população com água potável e regiões em que praticamente não há atendimento. Isso se deve não somente à falta de acesso a tecnologias de tratamento de água, mas também pela própria escassez da água.

No caso do Brasil, têm-se vivenciado a escassez de recursos energéticos e hídricos. A principal matriz elétrica brasileira, é a de fonte hidráulica, a qual sofreu uma retração de 5,4% em apenas 1 ano, no período entre 2013 e 2014. Segundo o relatório do Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015) pelo terceiro ano consecutivo houve redução na oferta de energia hidráulica. Isso se deve, em parte às condições hidrológicas desfavoráveis observadas ao longo do período, mesmo com o incremento de 3.177 MW de potência instalada no parque hidrelétrico. Segundo Rodrigues (2012) há uma tendência ao aumento da utilização dos recursos hídricos pelo setor energético, devido ao aumento da produção de bioenergia. Por exemplo, a biomassa para fins energéticos demanda volumes significativos de água, ou seja, sua “pegada hídrica” é maior. O conceito de pegada hídrica segundo Hoekstra e Hung (2002) é definido como o volume de água doce necessário para a produção de bens e serviços. A Tabela 1 apresenta relações ente as fontes de energia e a “pegada hídrica” correspondente.

Tabela 1 - Relação entre fonte e a "pegada hídrica" correspondente

Fonte	"Pegada hídrica" média (m³/GJ)
Energia eólica	0,0
Nuclear	0,1
Gás natural	0,1
Carvão	0,2
Solar	0,3
Petróleo	1,1
Hidroelétrica	22
Biomassa	72

Fonte: RODRIGUES (2012); GERBENS-LEENES *et al* (2009) e GLEICK (1994)

Segundo a EPE (2015) o consumo de energia elétrica no país em 2014 registrou um acréscimo de 2,9%, supridos, principalmente, a partir da geração de energia térmica. As matrizes energéticas brasileiras estão apresentadas na Figura 1, a qual pode ser observado o acréscimo de produção nas matrizes térmicas. O aumento no consumo de energia elétrica está associado à renda, ao clima e, até mesmo, ao acesso a energia elétrica. Portanto, para que haja o crescimento da oferta interna de energia frente ao crescimento do consumo, deverão existir medidas

de redução de perdas tanto na distribuição, quanto no consumo, ou seja, medidas que impactem sobre a eficiência do sistema.

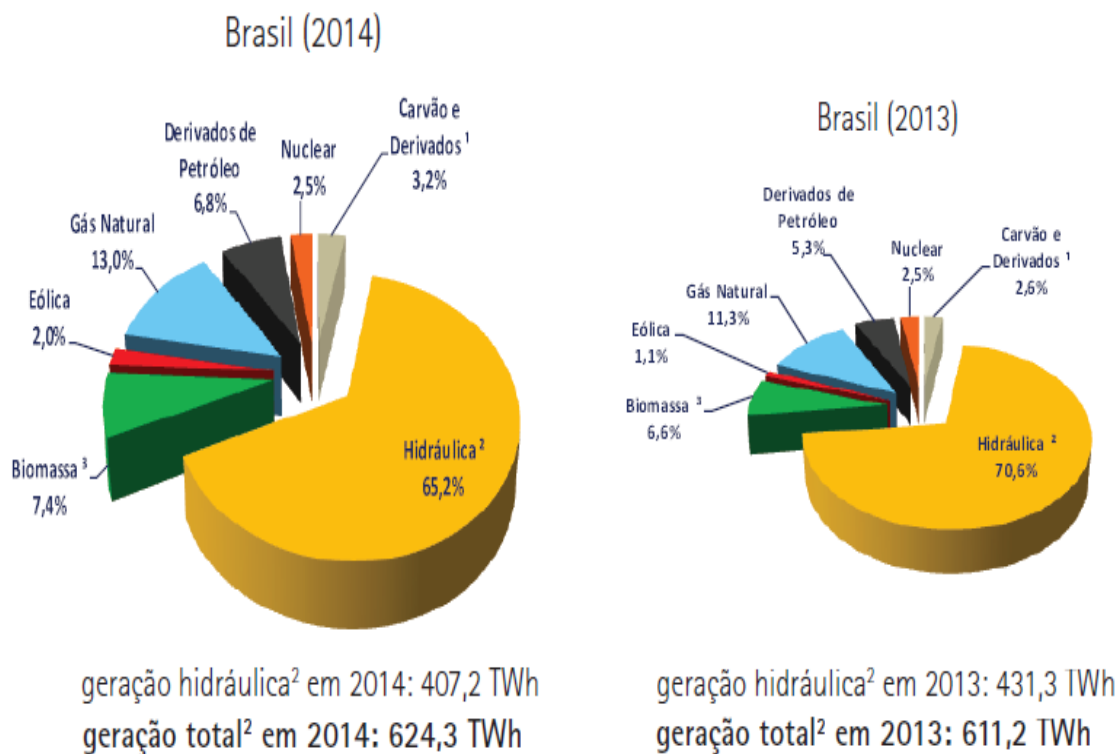


Figura 1 - Gráfico da participação das matrizes energéticas brasileiras nos anos de 2013 e 2014
Fonte: EPE (2015)

A utilização de energia é crucial para os padrões de produção e consumo que caracterizam as economias modernas. Garantir o fornecimento de energia suficiente e segura, evitar o uso excessivo de energia, limitar os efeitos secundários negativos sobre a saúde, meio ambiente e o clima é um processo sócio-econômico crítico. Os mercados e as políticas estão estreitamente interligados, os sinais de preços são uma característica-chave desse processo. Os preços podem influenciar a quantidade e o tipo de energia que diferentes usuários vão exigir, afetando o quanto os produtores estão dispostos a fornecer. Os impostos sobre o consumo de energia são uma ferramenta que os governos podem utilizar para influenciar os preços, mas eles não são a única ferramenta. Os governos podem intervir de forma direta nos mercados para definir ou regular os preços usando uma variedade de mecanismos.

A esse fato, deve-se o crescente número de pesquisas em eficiência energética. No Brasil, um exemplo é o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) concebido pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

(ELETROBRAS). O PROCEL promove o uso eficiente da energia elétrica combatendo o desperdício e reduzindo os custos de investimentos setoriais. Além disso, desde 2001 está em vigor a Lei nº 10.295, conhecida como a Lei de Eficiência Energética. Essa lei estimula o desenvolvimento tecnológico, a preservação ambiental e a introdução de produtos mais eficientes no mercado nacional (PROCEL, 2015).

A Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), em seu *press release* de resultados do 1º Trimestre de 2015, apresentou gastos com energia elétrica para prestação de serviços de água e esgoto, correspondente a 45,61% de sua receita, um aumento de 23,26% com relação ao mesmo período no ano de 2014. Com relação ao volume de água faturado, na comparação entre os períodos houve um acréscimo de 1,23%. Contudo, esse aumento não se deve somente ao fato de uma maior demanda, tanto no tratamento de água quanto no tratamento de esgoto, mas principalmente ao reajuste tarifário da energia elétrica ocorrido em 2014 e que entrou em vigor em 2015.

Diante do atual cenário, em que há constante aumento da demanda por energia elétrica e aumento dos custos de produção dessa energia, a atenção dos gestores volta-se a questão da eficiência energética. Segundo Vilanova e Balestieri (2014) a promoção do uso eficiente e racional de água e eletricidade em sistemas de abastecimento de água, desempenha um papel estratégico na busca do desenvolvimento sustentável das nações. O alto potencial para a aplicação de ações de uso racional de água e energia elétrica, têm sido atribuídas a pobre infraestrutura e procedimentos de operação, particularmente em países em desenvolvimento. Contudo, segundo Dias (1999) o uso eficiente de energia pode ser sistematizado em 6 níveis de intervenção: eliminação de perdas, aumento da eficiência das unidades consumidoras de energia, aumento do uso de energia de fontes renováveis para fins de bombeamento, reutilização dos recursos naturais por meio da reciclagem com recuperação de energia a partir de resíduos, descentralização da oferta e incentivos para o uso e melhoria da gestão local da água e mudanças no comportamento de consumo da população.

Com relação ao insumo água, segundo Arrais (2011) a principal preocupação reside no fato, de que a quantidade de água no planeta permanece inalterada,

enquanto o consumo de água cresce em ritmo mais acelerado que o aumento das populações.

No Brasil, vive-se um momento de escassez de água em várias regiões. Para Tundisi (2003) o Brasil apresenta todas as realidades com relação ao consumo de água. Apesar de ser a maior potência hídrica do planeta, a distribuição irregular da água em seu território gera o fenômeno de áreas em que as populações convivem, permanentemente com a seca e a escassez, em confronto com áreas de baixíssima densidade populacional, detentoras de abundância de água.

Segundo Carmo, Dagnino e Johansen (2014) a questão do volume populacional é importante, pois uma população maior exige mais investimentos em termos de infraestrutura e serviços básicos, que são necessários para diminuir a vulnerabilidade social diante das mudanças climáticas. Entretanto, existem outros aspectos a serem considerados na relação entre população e ambiente, como a forma de consumo da população, ou seja, como e quanto se consome de água. Assim, uma população reduzida, mas com hábitos de consumo elevados podem gerar problemas ambientais significativos.

3.2 Sistemas de Abastecimento de Água

3.2.1 Origens

Na história da civilização humana, há vestígios de algum tipo de estrutura de abastecimento, ou esgotamento em várias culturas. Entretanto, cabe salientar que não eram benefícios destinados a todos, pois eram restritos às mais altas castas. Segundo Landil (1993), em Atenas, bem como em toda a Grécia havia um grande cuidado com a qualidade da água e as nascentes eram selecionadas. Já na sociedade romana, uma das pioneiras na construção de aquedutos, havia um objetivo social. Em Roma, os banhos eram públicos, aberto a todos por serem construídos com recursos públicos.

No Brasil, já havia a preocupação com o saneamento nas comunidades indígenas. Nessas comunidades armazenavam-se água em vasilhames de argila e delimitavam-se áreas para as necessidades fisiológicas. No período colonial, o abastecimento de água era realizado por meio de bicas ou fontes, criando em torno de si as cidades. Na Bahia, por exemplo, um dos seus maiores sistemas de abastecimento no Brasil colonial foi a Fonte Grande, construída em 1746 na ilha de Morro de São Paulo e apresentada na Figura 2 (MORRO DE SÃO PAULO, 2015).



Figura 2 - Sistema de abastecimento de água no período colonial, Fonte Grande - BA
Fonte: o Autor (2014)

Na cidade de Curitiba, foi inaugurado em 1871 o primeiro chafariz de estilo localizado no antigo Largo Zacarias, atual Praça Zacarias. O chafariz foi projetado pelo engenheiro Antônio Rebouças Filho, iniciando então a história do encanamento de água no Paraná (SANEPAR, 2015), a Figura 3 apresenta a fotografia do chafariz em questão. Entretanto, com relação ao esgoto, segundo Ribeiro e Rooke (2010) mesmo as casas mais sofisticadas, eram construídas sem instalações sanitárias. Os escravos carregavam vasilhames cheios de fezes, em que o conteúdo era despejado nos rios e os vasilhames lavados para uso posterior. A população era descrente quanto à proliferação de doenças por meio de animais.



Figura 3 - Fotografia do primeiro chafariz da cidade de Curitiba, localizado no Largo Zacarias.
Fonte: Curitiba Antiga (2015)

Os problemas com saúde pública e poluição do meio ambiente impuseram aos governantes encontrar soluções de saneamento, para a coleta e tratamento de esgotos, abastecimento com água segura para consumo humano, coleta e tratamento dos resíduos sólidos e drenagem das águas pluviais. Segundo Galvão (2007) no final do século XIX deu-se início a reforma urbana na cidade do Rio de Janeiro. Essa reforma começou com a demolição de construções antigas e expulsão dos moradores, realinhamento de ruas, leis sobre o comércio e a permanência de pessoas e animais nas ruas. Medidas que alteraram diretamente os hábitos e costumes das classes de menor poder aquisitivo.

Somente no início do século XX, a questão sanitária começou a ter maior relevância, após uma série de epidemias de doenças com veiculação hídrica e também por doenças relacionadas a vetores como, ratos, pernilongos, entre outros. Por razão dessas epidemias, o médico Osvaldo Cruz iniciou algumas campanhas para o combate da febre amarela e outras epidemias. A importância da infraestrutura sanitária começou a ser considerada, segundo Lopes (2013) o processo mais eloquente do engenheiro sanitário Francisco Saturnino de Brito, foi à regeneração urbanística da cidade do Rio de Janeiro, compreendida em grande parte entre os anos de 1902-1905, incluindo a modernização do porto, abertura da avenida central e medidas de saneamento. Em 1919, o governo do Estado do Paraná contratou o engenheiro sanitário Francisco Saturnino de Brito para a elaboração de um novo sistema de abastecimento de água e de esgoto para a cidade de Curitiba.

Entretanto, segundo Tsutiya (2006) o imenso progresso com relação à implantação de sistemas de abastecimento de água se deu nas décadas de 1970 e 1980 com a implantação do PLANASA (Plano Nacional de Saneamento). Segundo Salles (2008), o plano foi implementado em um contexto de grande crescimento econômico, o que lhe garantiu viabilidade financeira, ao menos, em sua primeira etapa. Sua instituição durante o governo militar estabeleceu uma estrutura sólida de financiamento, prestação e gestão dos serviços de saneamento que ainda predomina nos dias atuais. A partir do PLANASA, foi criado um aparato tecnológico e uma forma de intervenção no espaço urbano, que foi adequado para permitir um acesso amplo da população a esses serviços. A Tabela 2 fornece dados do SNIS publicado em 2014 com relação aos índices de atendimento a população.

Tabela 2 - Índice de atendimento de abastecimento de água e tratamento de esgoto.

Região	Índice de atendimento com rede (%)				Índice de Tratamento dos esgotos (%)	
	Água		Coleta de esgotos		Esgotos gerados	Esgotos coletados
	Total	Urbano	Total	Urbano	Total	Total
	(IN055)	(IN023)	(IN056)	(IN024)	(IN046)	(IN016)
Norte	52,4	62,4	6,5	8,2	14,7	85,3
Nordeste	72,1	89,8	22,1	29,3	28,8	78,1
Sudeste	91,7	96,8	77,3	82,2	43,9	64,3
Sul	87,4	97,4	38,0	44,2	35,1	78,9
Centro-Oeste	88,2	96,3	42,2	48,6	45,9	91,6
Brasil	82,5	93,0	48,6	56,3	39,0	69,4

Fonte: SNIS (2014)

Atualmente, o sistema de abastecimento de água brasileiro possui normas e portarias para sua regulamentação. Segundo a Portaria N° 2914/2011 do Ministério da Saúde, o sistema de abastecimento de água para consumo humano é composto por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, desde a zona de captação até as ligações prediais, destinado à produção e ao fornecimento coletivo de água potável (BRASIL, 2011). O padrão de potabilidade exigido em território nacional, também é determinado por essa portaria.

3.2.2 Configuração de um Sistema de Abastecimento de Água (SAA)

A concepção e o projeto de um SAA, às vezes podem ser precedidos por um diagnóstico técnico e ambiental da área em estudo. A NBR 12.216/1992 – Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público, define uma ETA (Estação de Tratamento de Água) como conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade. Essa concepção deverá estender-se aos diversos componentes do sistema, que são:

- Manancial – corpo hídrico superficial ou subterrâneo de onde será retirada a água bruta;
- Captação – conjunto de estruturas situado junto ao manancial, do qual se retira a água bruta destinada ao sistema de abastecimento;

- Estação Elevatória – conjunto de obras e equipamentos destinados a recalcar a água bruta para a unidade seguinte;
- Adutora – canalização destinada a conduzir água entre as unidades;
- Estação de Tratamento de Água – conjunto de unidades operacionais destinado a tratar água de modo a adequar as suas características aos padrões de potabilidade;
- Reservatório – destinado a regularizar as variações entre as vazões de adução e de distribuição;
- Rede de Distribuição – formado por tubulações e acessórios, destinado a dispor água potável aos consumidores.

A Figura 4 apresenta uma representação esquemática de um sistema de abastecimento de água.

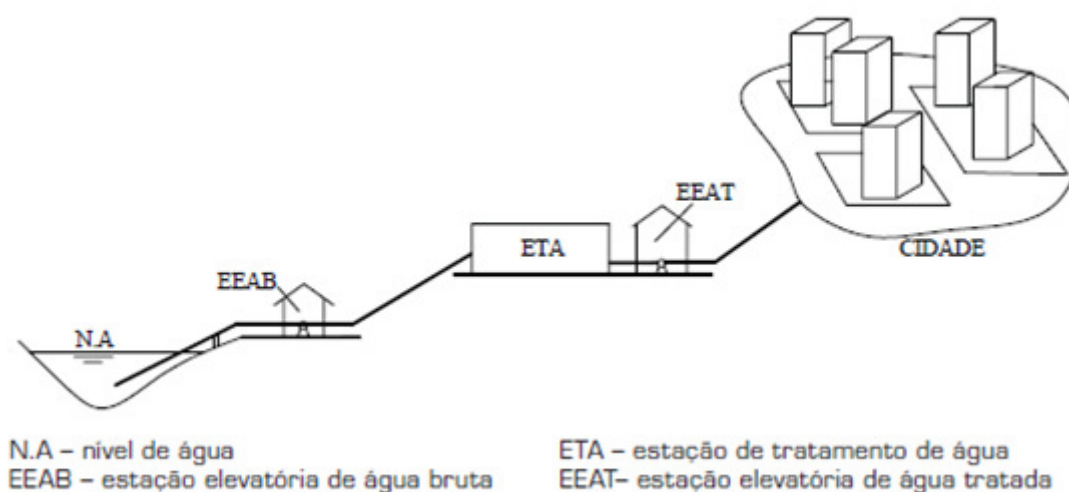


Figura 4 – Diagrama esquemático de um SAA.
 Fonte: ReCESA (2008)

O principal objetivo de um sistema de abastecimento de água é fornecer ao usuário, água de boa qualidade para seu uso, em quantidade adequada e pressão suficiente para atingir as zonas de maior cota da cidade em questão. O projeto de uma ETA depende principalmente da qualidade da água bruta e de sua captação (superficial ou subterrânea). Segundo Schagen *et al.* (2010) o desempenho de uma ETA é determinada pelo controle da sua planta. Tsutya (2006) aborda vários aspectos sociais, econômicos, físicos e demográficos para definição dos critérios e

parâmetros de projeto, porém uma instalação convencional com captação superficial é composta por: manancial, captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição. No caso de captação subterrânea ou de poços profundos, haverá poço de sucção, estação elevatória de água bruta, estação elevatória de água tratada, reservatório e rede de distribuição. Em ambos os casos observa-se a necessidade da utilização de estações elevatórias, seja para a adução ou para o transporte entre diferentes etapas, como apresentado na Figura 4. A análise do processo de tratamento de água potável mostra que o projeto de controle dos processos para uma ETA é uma tarefa complexa. Os processos de tratamento são sensíveis a processar perturbações, as variações de vazão influenciam diretamente em todos os processos (SCHAGEN *et al.*, 2010).

3.3 Sistemas Elevatórios

3.3.1 Apresentação

A água tratada para ser distribuída aos domicílios percorre um caminho complexo. Primeiramente teve de ser captada, transportada do manancial para a estação onde foi tratada e, depois, conduzida ao local onde é distribuída ao consumidor. Quando há condições topográficas favoráveis, os projetistas preferem realizar o transporte por gravidade, ou, quando isso não é possível, utilizam-se elevatórias. Denomina-se por estação elevatória o conjunto de bombas e acessórios utilizados para elevar a água de um ponto de menor cota topográfica a um mais alto.

A necessidade do uso de bombas para recalque eleva os gastos com energia elétrica, operação, instalação e manutenção de equipamentos. A operação e a manutenção adequadas de uma estação elevatória contribuem para um resultado eficiente em termos de pressão na rede e volume de água, proporcionando um melhor atendimento e, conseqüentemente, qualidade de vida à população.

A estação elevatória consiste basicamente de estrutura civil, elétrica, mecânica e tubulações. Pode-se inserir como sub-componentes eletromecânicos as bombas, motores, controle, painel, transformador, conversor de frequência e linha de transmissão. A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático de um sistema elevatório.

As elevatórias podem estar localizadas antes, dentro ou depois da ETA. Podem ser elevatórias de água bruta ou tratada, quando conduzem água bruta ou tratada, respectivamente. Quando a elevatória localiza-se entre um trecho e outro da rede de distribuição, ela recebe o nome de *booster* (ReCESA, 2008).

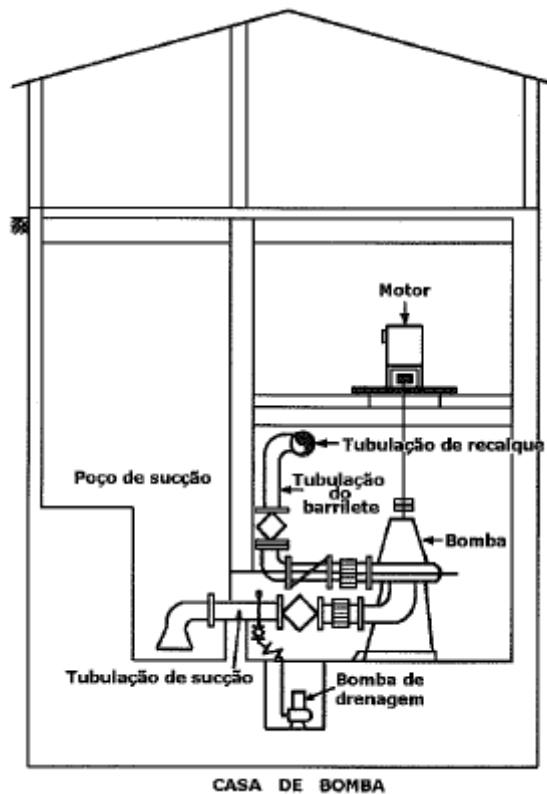


Figura 5 – Diagrama esquemático de uma casa de bombas.
 Fonte: TSUTIYA (2006).

O local de implantação de uma estação elevatória é escolhido de forma a permitir o funcionamento ininterrupto do sistema de abastecimento de água. Para a definição desse local é necessário o conhecimento das condições topográficas, hidrológicas e geológicas do terreno e, em função dessas informações, faz-se uma distribuição prévia dos elementos componentes do SAA (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2010).

Os sistemas de bombeamento são implementados à malha operacional tendo como objetivo o pleno atendimento dos pontos de consumo mais distantes em relação a ETA, com pressão e vazão adequadas. A otimização operacional desses sistemas de bombeamento nem sempre foi à principal preocupação, talvez pelo fato do custo da energia elétrica receber forte subsídio (RODRIGUES e LUVIZOTTO JR., 2003). Para Preis *et al.* (2011) sistemas de monitoramento contínuo têm sido propostos como uma abordagem promissora para melhorar os serviços públicos de água potável, detectando e respondendo eficientemente às ameaças ao sistema de distribuição de água, tais como aspectos hidráulicos e da qualidade da água.

3.3.2 Tipos de Bombas

Certamente das primeiras bombas que se tem notícia, a mais conhecida é o parafuso de Arquimedes, ainda muito utilizada principalmente em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Sendo este, um equipamento amplamente empregado nas mais variadas formas de utilização, com variedade de tamanhos e tipos.

As bombas hidráulicas são máquinas geratrizes que recebem trabalho mecânico fornecido por uma máquina motriz, transformando-o em energia hidráulica, impondo, dessa forma, ao líquido um acréscimo de energia sob a forma de energia potencial de pressão e cinética (MACINTYRE, 1997). As bombas podem ser classificadas com base nas suas aplicações, os materiais aos quais são construídos, os líquidos com os quais trabalham, e até mesmo quanto, a sua orientação no espaço (KARASSIK *et al.*, 2001). Contudo, serão abrangidas neste trabalho as bombas classificadas como de deslocamento direto e cinéticas.

Na classe das bombas de deslocamento direto, o líquido é confinado em um ou mais compartimentos, no qual sofre um aumento de pressão, onde é empurrado de uma posição estática inferior para uma posição estática superior. Segundo Macintyre (1997) podem ser acionadas a vapor, motor elétrico ou motor de combustão interna. Porém, Tsutiya (2006) analisa que devido ao advento da eletricidade, menor custo de operação, manutenção e melhor rendimento, há um predomínio de bombas centrífugas nas estações elevatórias. A Figura 6 apresenta uma representação esquemática de uma bomba de êmbolo.

As bombas cinéticas fornecem energia ao líquido sob a forma de energia de velocidade. No interior da bomba, esta energia é convertida em energia de pressão, elevando o líquido de uma posição inferior a uma posição mais elevada da tubulação. São divididas em centrífugas, periféricas e especiais. Este trabalho dará ênfase às bombas centrífugas.

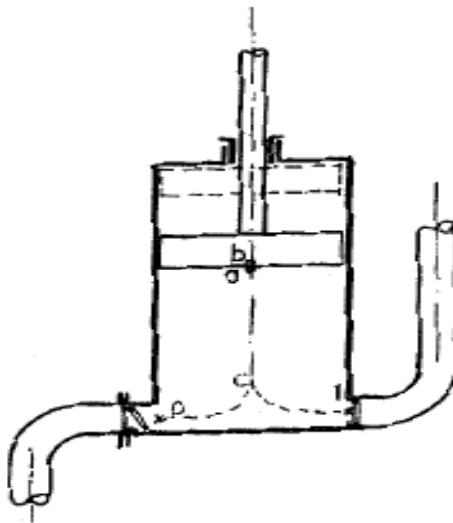


Figura 6 - Diagrama esquemático de bomba de êmbolo.
Fonte: MACINTYRE (1997)

Segundo Karassik *et al.* (2001) uma bomba centrífuga é uma máquina rotativa em que a vazão e a pressão são geradas dinamicamente. A entrada não é compartimentada como é o caso das bombas de Deslocamento. Em vez disso, uma bomba centrífuga fornece energia útil para o "bombeamento" do fluido, ou seja, cedendo energia cinética à massa em movimento transformando esta energia cinética internamente em energia de pressão, este fluido flui por meio do rotor e passagens fixas associadas da bomba; sendo assim uma bomba "rotodinâmica". Todas as bombas de rotor são rotodinâmicas, incluindo aquelas com fluxo radial, de fluxo misto e impulsores de fluxo axial. O termo "bomba centrífuga" tende a abranger todas as bombas rotodinâmicas.

De modo geral, as bombas centrífugas são constituídas por carcaça, rotor, vedações, mancais e pedestais que estão presos a uma base metálica. A Figura 7 ilustra uma representação de uma bomba centrífuga em corte.

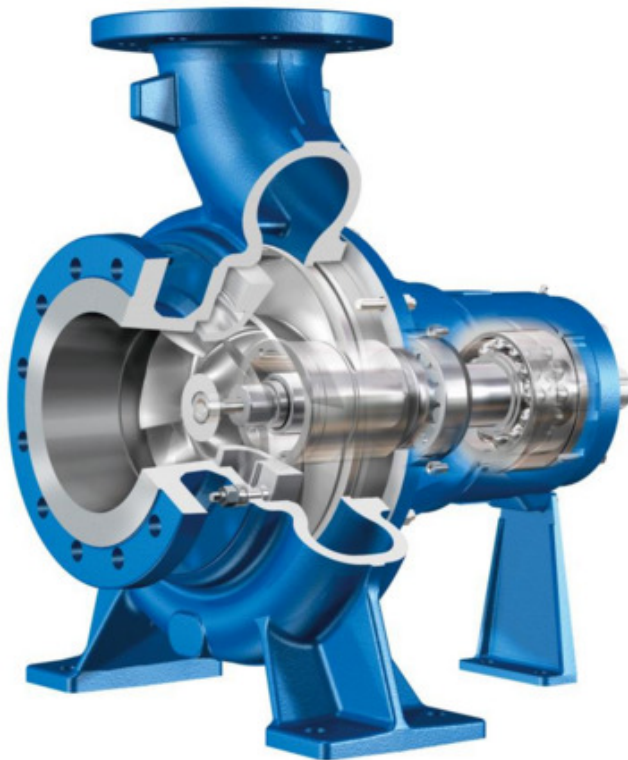


Figura 7 - Representação de uma bomba centrífuga em corte.
Fonte: SULZER (2015)

3.4 Associação entre Bombas

As configurações de associação entre bombas podem ser separadas em série ou em paralelo, dependendo das características do sistema. A associação em série é útil quando se deseja uma faixa de operação com elevados valores para a altura manométrica, ao qual não poderá ser atingida somente com o uso de apenas uma única máquina. Já a associação em paralelo é adequada quando se deseja alcançar uma faixa de operação com vazão elevada.

3.4.1 Associação em Série

Nesse tipo de associação podem estar presentes duas ou mais bombas, porém admite-se o caso de duas unidades. Segundo Macintyre (1997), as bombas são atravessadas sucessivamente pela mesma vazão, cada conjunto fornecerá uma parcela da altura total (H). Sendo conhecidas as curvas características de cada

bomba, a curva característica do conjunto será formada pela soma das alturas (H) para cada parcela de vazão (Q).

Esse tipo de arranjo é utilizado quando se deseja obter maior possibilidade quanto à variação da altura total, por exemplo, quando o sistema deve atender a reservatórios em níveis diferentes. Dessa maneira, pode-se utilizar bombas iguais ou não. A Figura 8 apresenta um desenho esquemático de uma associação em série.

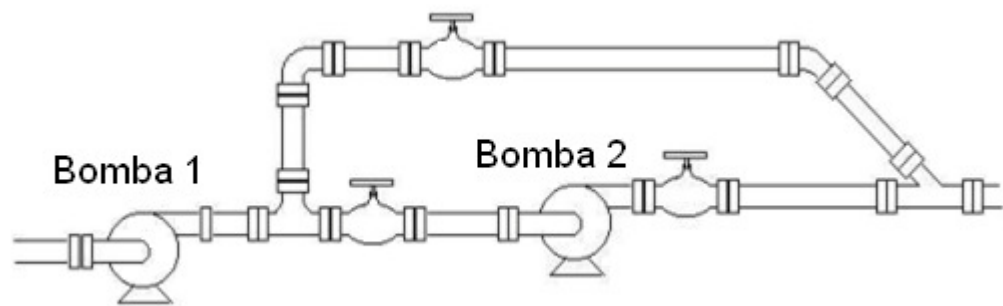


Figura 8 - Desenho esquemático de um exemplo de associação de bombas em série.
Fonte: UNESP (S/D)

3.4.2 Associação em Paralelo

É o tipo mais comum de associação em elevatórias. Pode-se ter duas ou mais bombas operando em paralelo, as quais enviam o líquido succionado por meio de uma única tubulação de recalque. Segundo Tsutiya (2006), a curva combinada de bombas paralelas é dada pela soma das vazões (Q) para a mesma altura manométrica (H). Este tipo de configuração é o mais comum em estações elevatórias, segundo Macintyre (1997) se não houvesse perdas de carga devido à tubulação, a vazão seria duas vezes o valor de uma. De forma geral, a descarga obtida com x bombas em paralelo é x vezes menor que a descarga de uma das bombas funcionando isoladamente em condições análogas. A Figura 9 apresenta um desenho esquemático como exemplo para associações de bombas em paralelo.

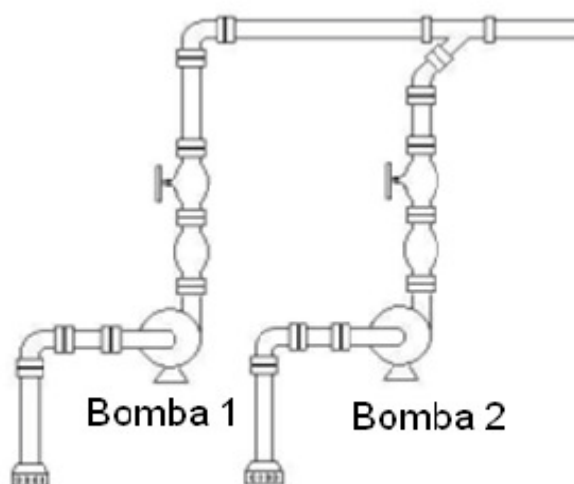


Figura 9 - Desenho de uma associação de bombas em paralelo.
Fonte: UNESP (S/D).

3.5 Motores Elétricos

Os motores elétricos são os mais utilizados para acionamento de bombas devido à sua simplicidade, praticidade e confiabilidade. São máquinas que possuem a função de transformar energia elétrica em energia mecânica. Segundo Oliveira Filho *et al.* (2010), no Brasil, os motores representam mais de 50% do uso final de energia elétrica da indústria.

Segundo Garcia (2003) o motor elétrico funciona a partir da propriedade que a corrente elétrica possui de gerar um campo magnético. O campo magnético varia em relação a um condutor, provocando neste condutor uma corrente elétrica. De forma geral, formam-se dois ímãs, um no estator e outro no rotor, cuja interação provoca o movimento do motor.

Os motores síncronos são motores de corrente alternada, o rotor é constituído por um ímã permanente ou bobinas alimentadas em corrente contínua mediante anéis coletores. Nesse caso, o rotor gira com uma velocidade diretamente proporcional a frequência da corrente no estator e inversamente proporcional ao número de pólos magnéticos do motor (NOLL, SD). São motores de velocidade constante, utilizados somente para grandes potências devido ao seu alto custo de fabricação. Segundo AISSE e BRAGA (2013), seu custo torna-se competitivo em relação aos motores de indução, a partir de 200 CV.

Com relação aos motores de indução, nesse tipo de motor a velocidade de rotação não coincide exatamente como na rotação síncrona, devido ao escorregamento. Assim, motores de indução estão inseridos na categoria dos motores assíncronos. A rotação desses motores é de 2 a 5% menor que o de rotação síncrona (TSUTIYA, 2006). São divididos em monofásicos para acionamento de cargas de potência até 5 CV. Os motores de indução trifásicos são os mais utilizados e, segundo Gomes (2009), representa cerca de 90% dos motores de indução produzidos. Este não necessita de circuito auxiliar de partida, sendo assim menor, simples e mais leve que o motor de indução monofásico de mesma potência, possuindo menor custo devido à sua simplicidade (NOLL, SD). A Figura 10 ilustra a representação de um motor de indução.

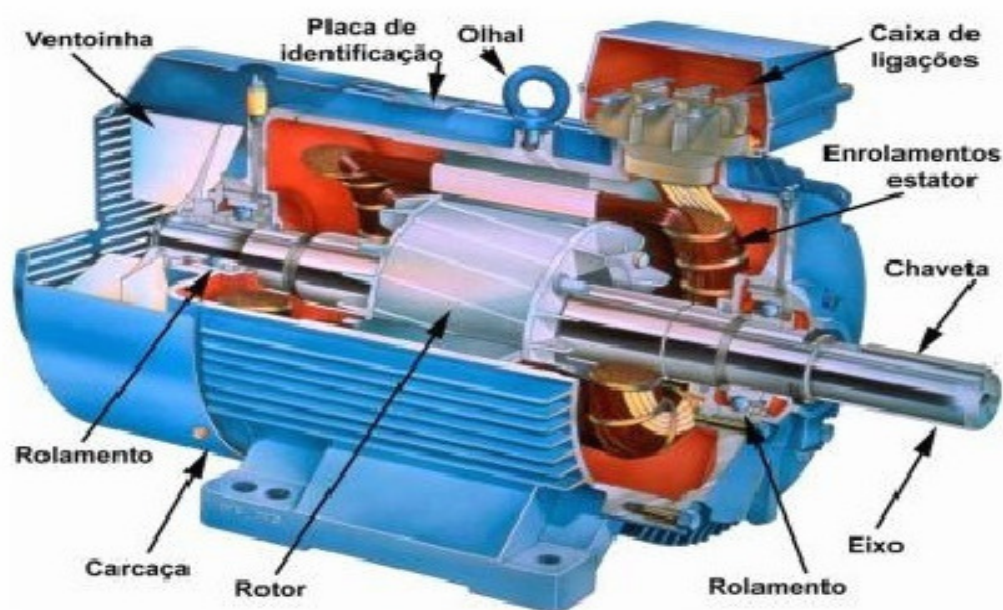


Figura 10 - Figura representativa de um motor de indução.
Fonte: PORTAL DO ELETRICISTA (2015)

3.6 Variáveis de Dimensionamento

3.6.1 Altura manométrica (H)

Segundo Macintyre (1997) este parâmetro é representado pela diferença das alturas representativas na sucção e na saída da bomba. Em sua dedução, Macintyre (1997) conclui que a altura manométrica é a soma das alturas totais de aspiração e de recalque.

$$H = H_{\text{sucção}} + H_{\text{recalque}} \quad (1)$$

em que:

$H_{\text{sucção}}$ = altura total de aspiração

H_{recalque} = altura total de recalque

3.6.2 Potência hidráulica

A energia total entregue ao fluido pela bomba é a altura manométrica (H), que representa a quantidade de energia recebida por cada unidade de peso do fluido bombeado (GOMES, 2009). A obtenção da potência hidráulica (P_H), também conhecida como potência útil, ocorre segundo o seguinte equacionamento.

$$P_H = \gamma QH \quad (2)$$

em que:

γ = peso específico do líquido (N/m³)

Q = Vazão (m³/s)

H = altura manométrica (mca)

3.6.3 Rendimento do conjunto motobomba (η)

Para que a bomba forneça esta potência útil utilizada pelo fluido para o seu escoamento, a bomba recebe potência motriz (P_e) de um motor elétrico. A P_e deve ser maior que P_H , pois a conversão da potência motriz em energia ao fluido envolve

perdas decorrentes desta transformação. Então, as perdas são expressas por meio do conceito de rendimento ou eficiência.

A definição de rendimento (η) de uma máquina é expressa como o quociente entre a potência hidráulica (P_H) e a potência absorvida pela máquina (P_e). Então, a seguir a equação resultante.

$$\eta = \frac{P_H}{P_e} \quad (3)$$

Segundo Gomes (2009), os rendimentos de bombas de grande porte podem atingir mais de 85%, enquanto as bombas de pequenas unidades podem chegar a menos de 40%. Porém, como valores de referência para cálculos preliminares pode-se adotar valores de 40% a 60% para bombas de médio porte.

3.6.4 Net Positive Suction Head (NPSH)

A fim de caracterizar condições para que a sucção do líquido pela bomba seja adequada, foi introduzido na terminologia de instalações de bombeamento o conceito de *Net Positive Suction Head* (NPSH). Este parâmetro estima a energia com que o líquido acessa o bocal de entrada da bomba.

O trabalho que uma bomba realiza succionando líquido de um reservatório, cujo nível está abaixo do eixo do bocal de sucção da bomba, deve-se calcular nesse caso, além da altura total de elevação do sistema, o NPSH da instalação. Cada modelo de bomba possui um limite de sucção, ao qual está associado à pressão ambiente do local de instalação, a altura manométrica de sucção e a todas as características do líquido bombeado. Quando a bomba succiona, a pressão na tubulação e na entrada do equipamento é reduzida. Em consequência disso, a pressão ambiente no reservatório de sucção pressiona o líquido para dentro da tubulação, realizando assim o bombeamento. A Figura 11 apresenta exemplos dos tipos de sucção, quando o eixo do conjunto motobomba encontra-se acima do nível do reservatório inferior, a instalação será denominada como “não afogada” ou sucção negativa. No entanto, quando o eixo do conjunto motobomba estiver abaixo do nível do reservatório inferior, a configuração será denominada como “afogada” ou sucção positiva.

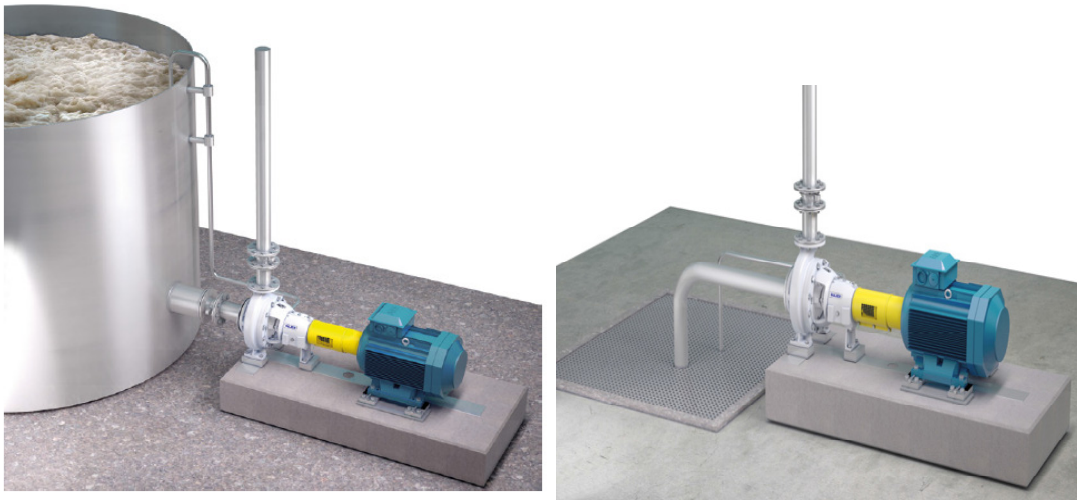


Figura 11 - Exemplos dos tipos de sucção, à esquerda esquema de sucção positiva e à direita, representação esquemática de sucção negativa.
Fonte: Catálogo SULZER(2015).

Atualmente, o NPSH ainda é mal compreendido e aplicado, resultando em um ou outro projeto dispendioso sobre novos sistemas ou operação não confiáveis de sistemas de bombeamento (ZACHER, 2000). Evitar esses problemas requer uma previsão acurada do NPSH requerido ($NPSH_r$), e garantia de fornecimento suficiente de NPSH disponível ($NPSH_d$).

O parâmetro de $NPSH_d$ é, por definição, a disponibilidade de energia acima da sua pressão de vapor com que o líquido entra na bomba, ou seja, é a pressão total obtida. Esta energia depende da maneira como a bomba se encontra instalada e de suas condições operacionais. A Figura 12 apresenta as diversas energias envolvidas na região da sucção da bomba.

Ao estudar-se as parcelas de energia em uma instalação de bombeamento, observa-se que a equação da energia é aplicada entre a superfície livre do líquido na captação e a entrada da bomba (localizada próxima à altura de eixo da bomba), região de interesse para o estudo do $NPSH_d$ por apresentar o local com menor pressão.

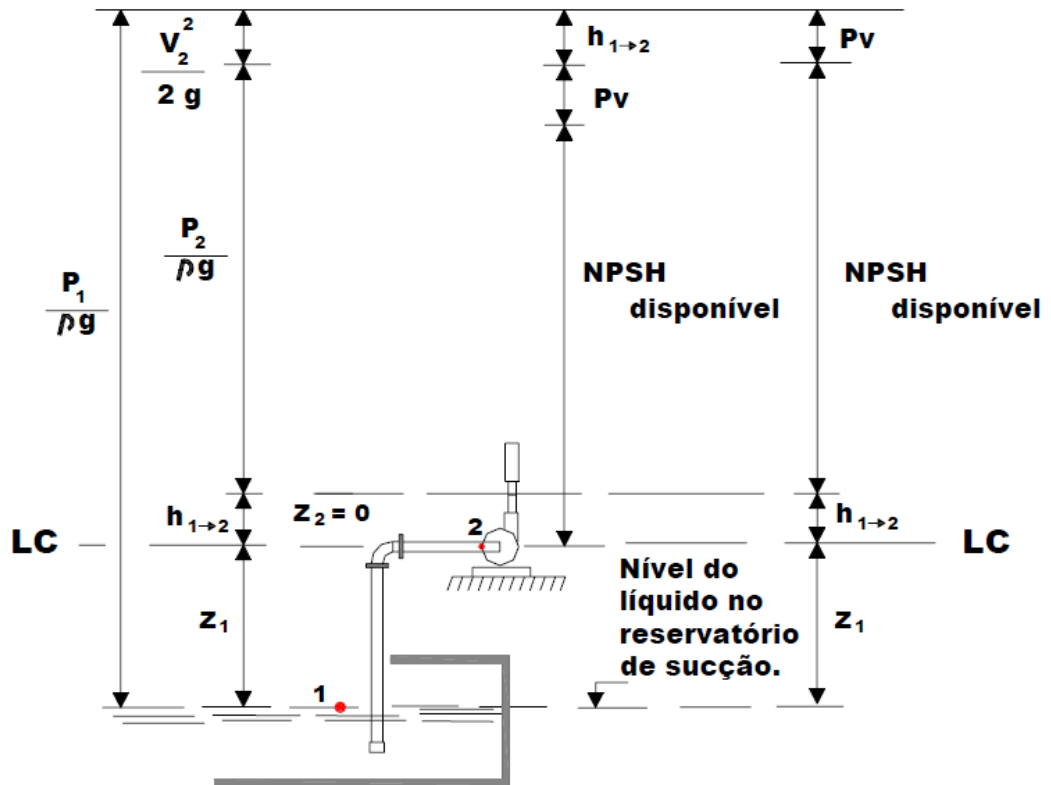


Figura 12 – Representação esquemática das energias envolvidas na região da sucção da bomba
 Fonte: MACINTYRE (1997).

Segundo Coelho (2006), a partir das características da instalação da bomba é possível obter o parâmetro de $NPSH_d$, ao qual pode-se encontrar numericamente pela seguinte equação.

$$NPSH_d = \frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (4)$$

em que:

p_2 = pressão ocorrendo no ponto 2 (Pa)

p_v = pressão de vapor (Pa)

V_2 = velocidade no ponto 2 (m/s)

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3), em função da temperatura de trabalho

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

Z_2 = cota do ponto analisado ao plano de referência, ou seja, eixo da bomba, neste caso $Z_2 = 0$ m.

Porém, como se identifica se uma bomba trabalha com o $NPSH_d$ insuficiente? Segundo McNally (2004), é possível dizer que isso ocorre quando a bomba funciona com capacidade muito inferior à sua capacidade nominal, produzindo ruídos como se estivesse bombeando pedregulhos, sendo esses indícios da ocorrência do fenômeno de cavitação.

Para que ocorra um bombeamento bem sucedido, segundo Buhagiar (2005), é necessário que o $NPSH_d$ exceda o $NPSH_r$ com uma margem de segurança adequada. Várias orientações são sugeridas por grandes fabricantes e organizadores de normas. Geralmente, deve-se manter uma margem de 1 m entre os $NPSH$'s, embora com conhecimento das peculiaridades do sistema em questão pode-se tolerar diferenças menores que 1 m.

A fim de aumentar o parâmetro de $NPSH_d$ em um sistema de bombeamento, segundo McNally (2004) pode-se:

- Elevar o nível de líquido no poço de sucção;
- Elevar a cota do poço de sucção;
- Abaixar a cota do eixo da bomba;
- Instalar uma bomba tipo *booster* entre o poço e a bomba de sucção para pressurizar o fluido succionado no poço;
- Assegurar que a tubulação de sucção do poço não esteja obstruída (em países de clima frio poderá ocorrer congelamento);
- Reduzir as perdas de energia da tubulação;

O parâmetro de $NPSH$ requerido ($NPSH_r$) para bombas centrífugas é uma característica da bomba fornecida pelo fabricante. Sua finalidade prática é impor limitações às condições de sucção da bomba, indicando aos projetistas a quantidade de energia necessária acima da pressão de vapor para que o líquido acesse o flange de sucção, vencendo as perdas de carga. Dado isso, o $NPSH_r$ depende dos elementos do projeto da bomba como o diâmetro do rotor, a rotação específica, elementos esses em geral fornecidos pelo fabricante. Para a determinação do $NPSH_r$, o fabricante desenvolve testes com água utilizando diferentes configurações,

estrangulando-se o lado de sucção ou da descarga para se obter essas especificações.

Segundo Misquiati (2005), a determinação do $NPSH_r$ pode ser realizada a partir de ensaios com circuito fechado, utilizando-se bancadas específicas onde uma bomba alimenta o circuito fechado succionando o líquido de um tanque hermético cuja pressão interna pode ser variada por uma bomba de vácuo conectada na parte superior do tanque. A Figura 13, de autoria de Yedidiah (1996), apresenta o circuito citado.

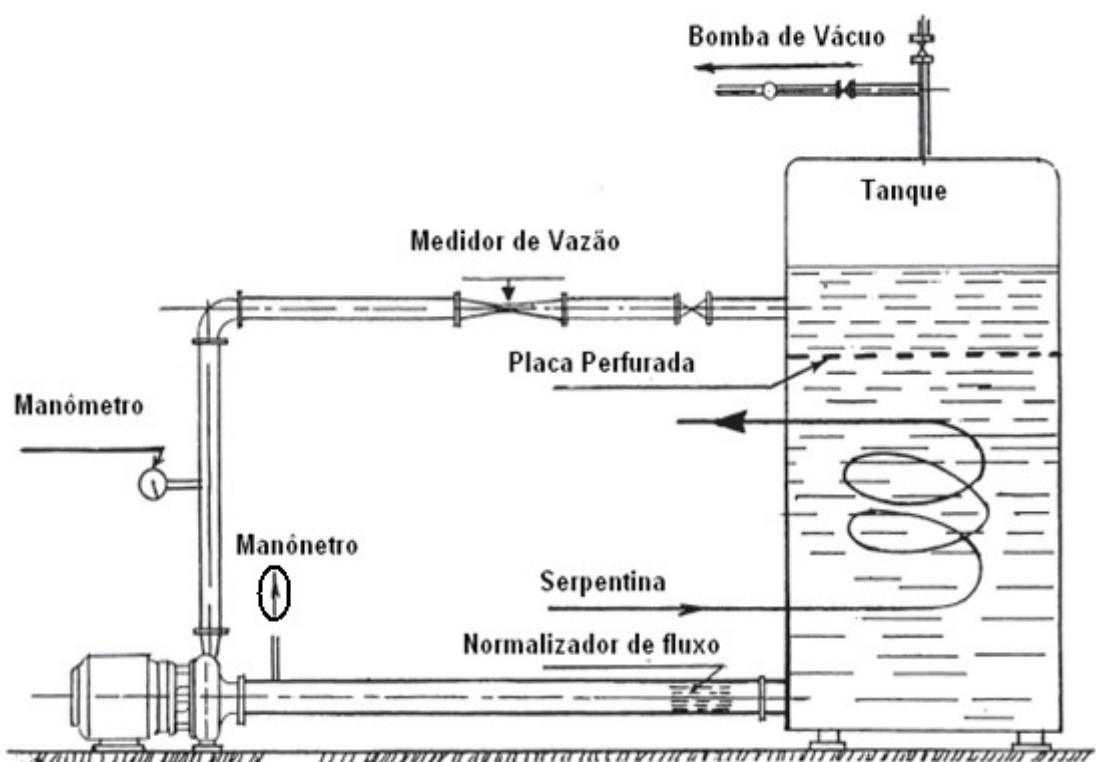


Figura 13 - Circuito de teste fechado para determinação de $NPSH_r$ de uma bomba.
Fonte: Adaptado de YEDIDIAH (1996).

O ensaio é realizado reduzindo-se o $NPSH_d$ gradativamente, iniciando com um valor ao qual não ocorre cavitação e mantendo-se a vazão constante. Essa redução de $NPSH$ ocorre por meio da redução da pressão interna no reservatório de sucção. Com a utilização da bomba de vácuo pode-se reduzir a pressão na superfície do líquido a ser bombeado.

O *Hydraulic Institute Standards* (1982) adota como método para definição de $NPSH_r$ de uma bomba, a ocorrência de uma queda de 3% na altura útil para uma

determinada vazão. Para a obtenção do $NPSH_r$ são mantidos constantes a vazão e a velocidade de rotação do motor elétrico durante os ensaios, enquanto o $NPSH_d$ é diminuído até que os efeitos da cavitação possam ser observados e medidos com a queda da altura útil. Então, o valor do $NPSH_d$ para o qual ocorre uma queda de 3% na altura de elevação é igual ao $NPSH_r$ da bomba.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui a NBR 6400/1989 – Bombas Hidráulicas de fluxo de (classe C) – ensaios de desempenho e de cavitação, a qual propõe 2 tipos distintos de ensaios sendo um para verificar a não ocorrência de cavitação no ponto de serviço da bomba e outro para provocar cavitação reduzindo-se o $NPSH_d$. Para o segundo método, a norma salienta a aceitação para dois critérios. O primeiro critério utiliza uma queda máxima de 3% na altura total de elevação (H) ou no rendimento da bomba (η), a determinada vazão. Já o segundo critério utiliza a queda máxima de 3% na vazão da bomba (Q) ou no rendimento da bomba (η).

Outros métodos também podem ser aplicados para estimar o $NPSH_r$. Segundo Yedidiah (1996), por meio de formulações empíricas baseadas em dados de mais de 600 bombas centrífugas dos 12 maiores e mais conceituados fabricantes no mundo, a obtenção do $NPSH_r$ é realizada por meio da vazão desde que a rotação seja a mesma utilizada para a construção do gráfico. Por meio dessas formulações, Yedidiah (1996) obteve os gráficos apresentados nas Figuras 14 e 15. A Figura 14 apresenta a formulação para a rotação de 1760 rpm.

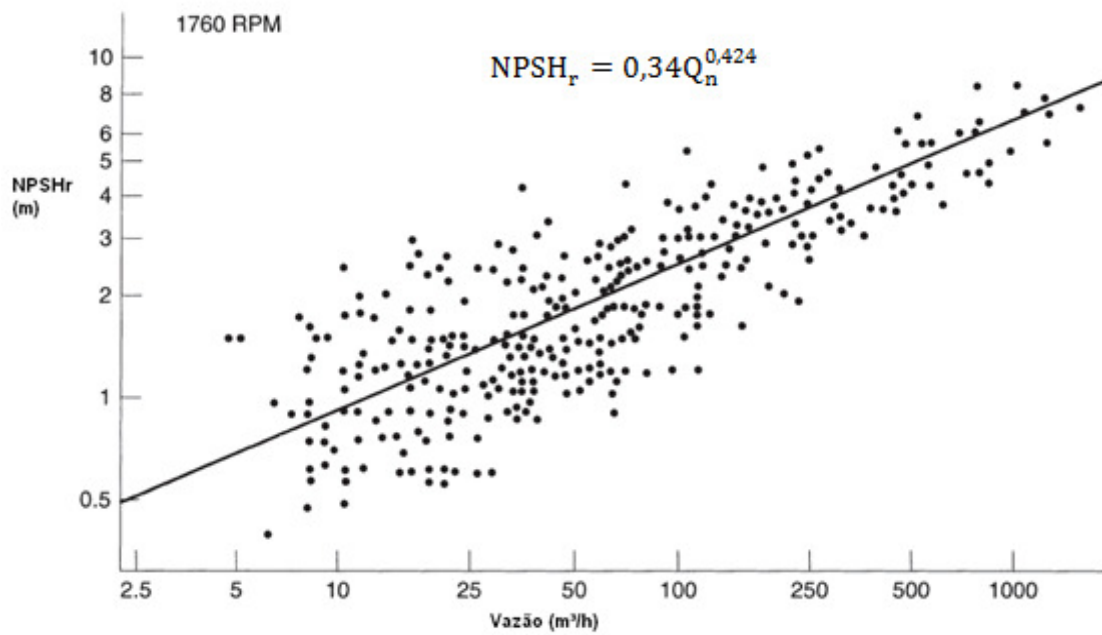


Figura 14 - Gráfico para estimativa de NPSHr para bombas com rotação de 1760 rpm.
 Fonte: Adaptado de Yedidiah (1996).

Para bombas com rotação de 3500 rpm deve-se utilizar o gráfico apresentado na Figura 15.

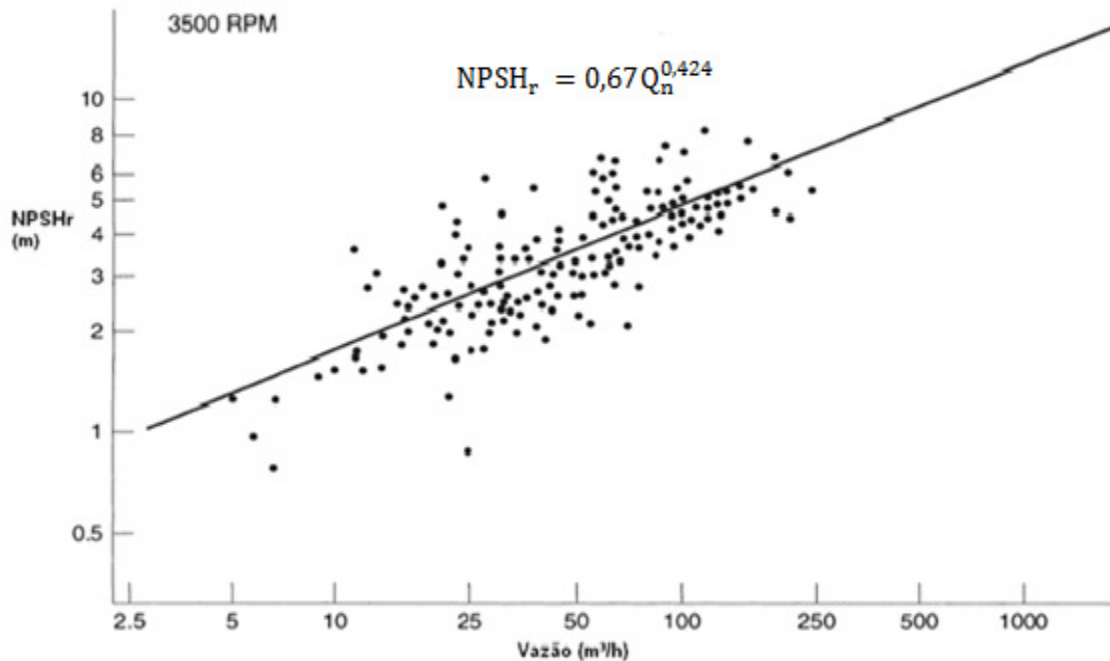


Figura 15 - Gráfico para estimativa de NPSHr para bombas com rotação de 3500 rpm
 Fonte: Adaptado de Yedidiah (1996).

Com o auxílio desses gráficos pode-se obter uma estimativa razoável para o $NPSH_r$, caso não se tenha dados de catálogo referentes à bomba utilizada.

3.7 Cavitação

3.7.1 Definição

A palavra cavitação tem sua origem no latim *cavus* (cavidades), significa a formação de bolhas de vapor em um líquido. A cavitação é a mudança de estado físico de um líquido para vapor, devido às alterações na pressão, ou seja, a redução da pressão em um sistema até que o líquido iguale-se a sua pressão de vapor equivalente a temperatura correspondente. Pode também ocorrer à cavitação quando a temperatura do líquido bombeado for aumentada.

Segundo Falvey (1990), existem dois tipos de cavitação: a vaporosa e a gasosa. Cannizzaro e Pezzinga (2005) definem que a cavitação gasosa ocorre quando a pressão cai abaixo da pressão de saturação, porém mantêm-se acima da pressão de vapor, sendo caracterizado pela presença de um grande número de núcleos gasosos. No entanto, quando a pressão cai rapidamente e abaixo da pressão de vapor do líquido, uma liberação significativa de gás pode ocorrer com um crescimento repentino de núcleos vaporosos. Nesse caso, ocorre a cavitação vaporosa. Segundo Wylie (1992), ambos os tipos de cavitação podem ocorrer durante um transiente de baixa pressão. Para o entendimento dessa classificação é importante analisar o processo de ebulição da água. A Figura 16 apresenta o diagrama com as fases da água e suas tendências à solidificação, ebulição e cavitação.

O diagrama apresenta que com o aumento da pressão e maior temperatura a tendência é a ebulição, porém para uma mesma temperatura, baixando-se a pressão a tendência será à cavitação. Segundo Nosov, Gómez-Mancilla e Meda-Campana (2011) o aquecimento da água devido à cavitação é um processo bastante lento, a geração de calor dentro da região de cavitação é praticamente inexistente.

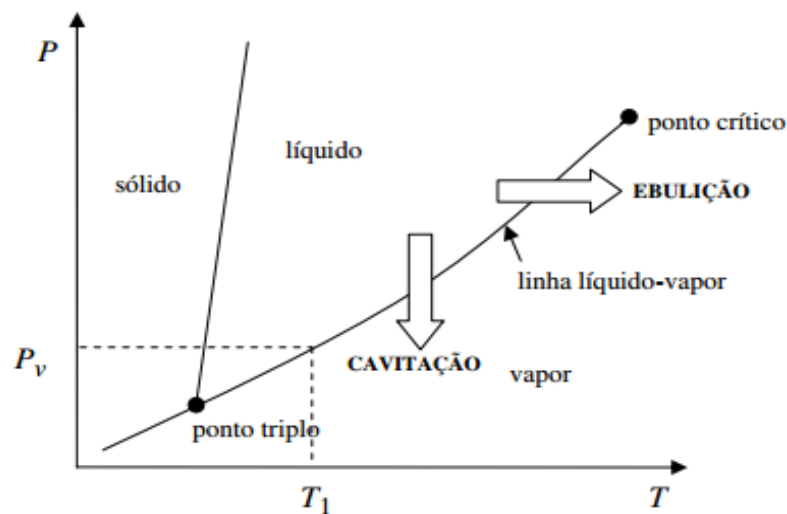


Figura 16 - Diagrama de fases da água
 Fonte: Adaptado BRENNEN (1995).

3.7.2 Descrição do Fenômeno

Tal fenômeno ocorre quando um líquido, a certa temperatura, escoar por uma região de baixa pressão, podendo assim atingir sua pressão de vapor. Formam-se bolhas de vapor, ou cavidades, que provocam uma diminuição da massa específica do líquido. Essas bolhas são arrastadas pelo escoamento até atingirem regiões de maior pressão, onde acontece o seu colapso devido à condensação, mudança de fase da substância em estado de vapor para a fase líquida. A Figura 17 apresenta as etapas de formação da cavitação em escoamento por um estrangulamento (Venturi).

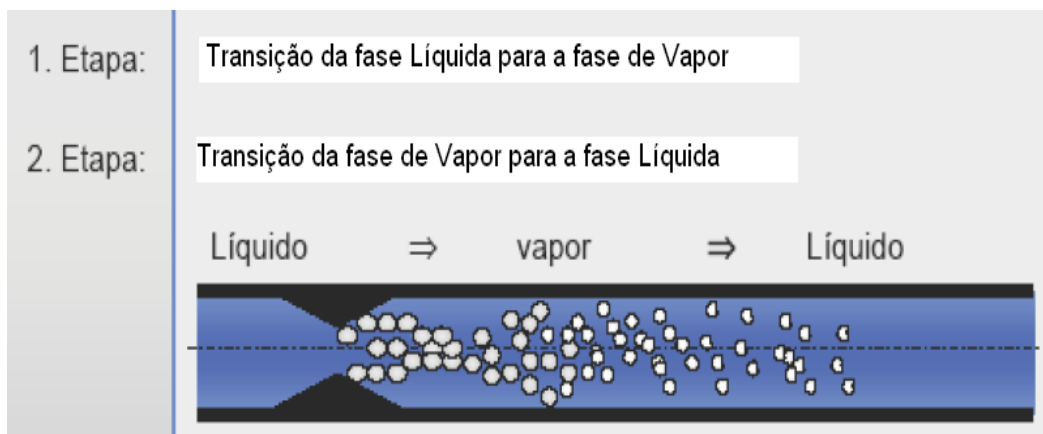


Figura 17 - Etapas de formação da cavitação por um estrangulamento.
 Fonte: Adaptado MARCHEGIANI (2006).

Então, quando a pressão atuante no líquido torna-se maior que a pressão interna existente na bolha de vapor, as dimensões da bolha reduzirão bruscamente em decorrência da mudança de fase. Essa brusca variação de pressão provoca o colapso das bolhas por um processo de implosão extremamente rápido. A Figura 18 apresenta o comportamento físico das bolhas.

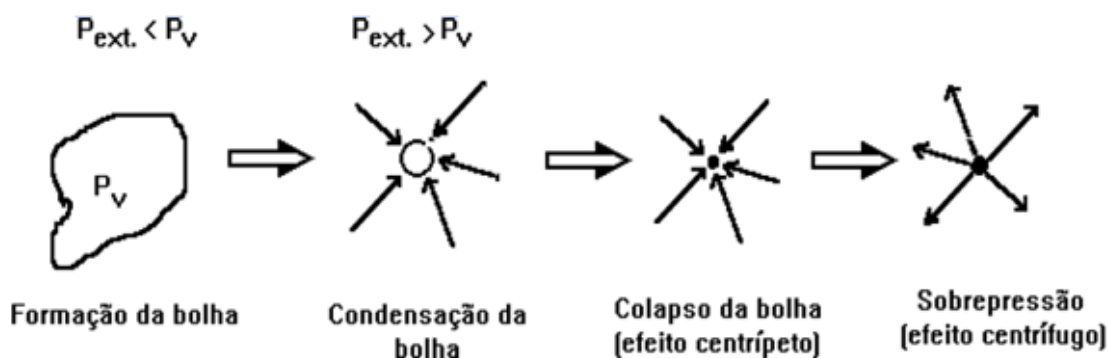


Figura 18 - Comportamento das pressões no desenvolvimento das bolhas de ar em condições de cavitação
 Fonte: DEMEC/UFPR (S/D).

Porém, nem todas as bolhas de vapor oriundas deste processo conseguem energia suficiente para voltar ao estado líquido, seguindo o escoamento pelo sistema após a condensação. Segundo Sulzer (2010), as bolhas de vapor são arrastadas no fluxo. Embora para um observador as bolhas pareçam estacionárias nesta zona de formação, a implosão abrupta dessas bolhas ocorrerá em regiões de pressões maiores que as de sua origem. Eventuais danos devido à cavitação ocorrerão nessas regiões expostas ao colapso, causando assim erosão por cavitação, ruídos e vibrações.

3.7.3 Evolução da cavitação

Em sistemas de bombeamento a cavitação clássica ou cavitação por baixo $NPSH_d$ é função de $NPSH_d$ e $NPSH_r$. A evolução do fenômeno de cavitação pode ser representada pela Figura 19, a qual apresenta a sequência dos eventos.

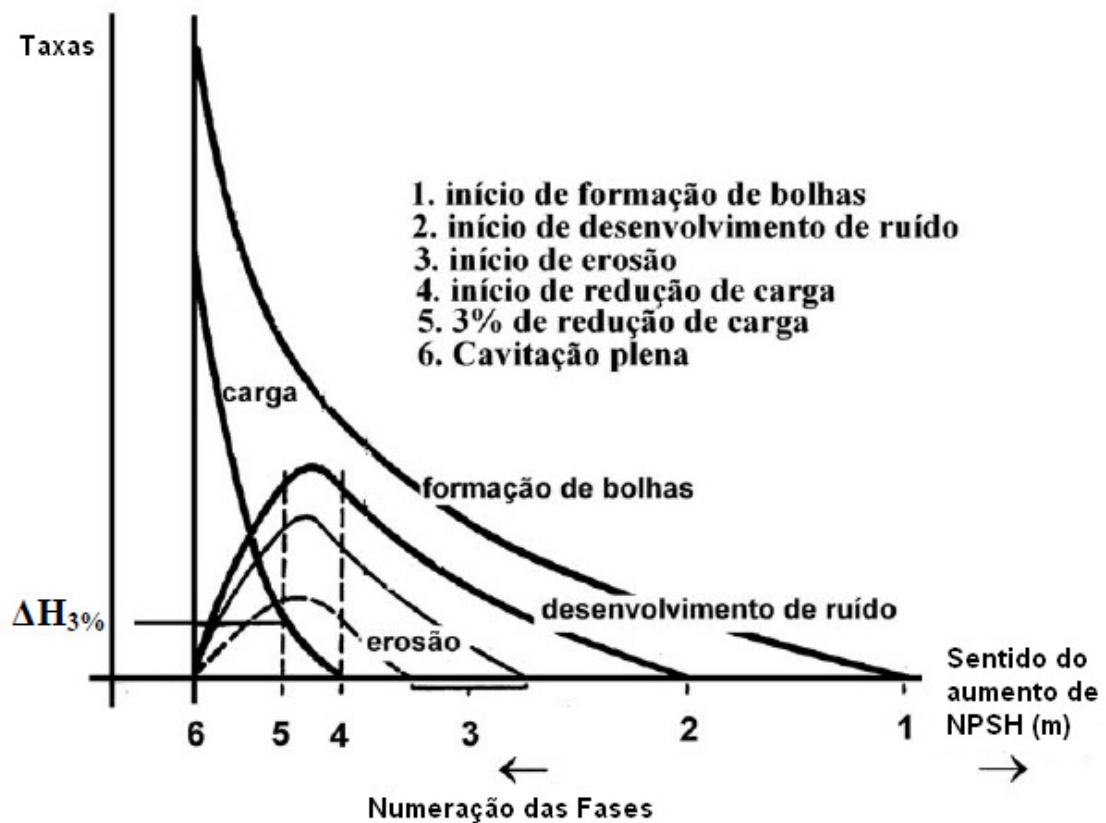


Figura 19 - Fases da evolução do fenômeno de cavitação.
 Fonte: Adaptado MISQUIATI (2005).

- Fase 1 – Início da formação de bolhas – nesta fase dá-se o início da formação de bolhas, porém a frequência sonora ainda não é audível (cavitação incipiente).
- Fase 2 – Desenvolvimento de ruído – há aumento das frequências sonoras e de implosão das bolhas possibilitando a audição de sons característicos.
- Fase 3 – Início de erosão – início da erosão das partes componentes da bomba exposta as tensões provocadas pelo contato com as bolhas de cavitação. A erosão depende da resistência do material.
- Fase 4 – Início da redução de carga (NPSH) – se a energia disponível na sucção for menor que o valor deste ponto, a carga da bomba começará a cair, proporcionando um aumento das taxas de erosão e ruído.

- Fase 5 – 3% da redução da carga ($NPSH_{3\%}$) – Neste ponto acontece a definição do NPSH requerido.
- Fase 6 – Cavitação plena – ocorre uma queda brusca da energia fornecida pela bomba.

3.7.4 Intensidade de Cavitação

A intensidade da cavitação pode ser classificada em até quatro níveis distintos de intensidade, partindo de um estado do escoamento sem a ocorrência do fenômeno, até a um nível com a mais alta intensidade de cavitação. De acordo com Ball e Tullis (1975) estes níveis são:

- A cavitação incipiente é o início da cavitação quando seus primeiros efeitos começam a ser perceptíveis, formações de bolhas ocasionais. Os ruídos são leves e intermitentes, pode-se observar vibrações discretas, muito leves as quais não produzem maiores efeitos ao funcionamento do sistema hidromecânico.
- Para a cavitação crítica os efeitos são caracterizados por seu regime constante com a produção de ruído contínuo semelhante a um chiado de toucinho em processo de fritura (*frying bacon noise*), segundo Falvey (1990) há ocorrência no fluxo de muitas bolhas de pequenos diâmetros. Os efeitos prejudiciais da operação sob este nível de cavitação são observados para longos períodos de exposição. A intensidade das vibrações é razoável, mantendo um nível de ruído aceitável para um serviço contínuo.
- A cavitação com perigo incipiente apresenta implosões das cavidades de vapor produzindo, dessa forma, ruídos relativamente altos, mas com um tolerável nível de vibrações. Entretanto a exposição do sistema a essa intensidade de cavitação proporciona pequenos danos físicos.
- Na condição de cavitação plenamente estabelecida, a pressão média próxima à jusante da região em análise, alcança valores da pressão de

vapor do líquido. O escoamento é acompanhado de um nível excessivo de ruído e vibrações.

3.7.5 Danos por cavitação

O dano causado pela cavitação é uma forma especial de corrosão e erosão, causada pela formação e colapso das bolhas de vapor próximas à superfície sólida. Este tipo de dano pode ocorrer em turbinas hidráulicas, propelentes de navio, rotor/pás de bombas, medidores de vazão, válvulas de controle e outros equipamentos onde pode-se encontrar variações de pressão, temperatura e vazão.

A repetição desse processo em alta velocidade, como no caso de uma bomba succionando água, há a formação de bolhas de vapor de água e colapso rápido destas com as partes constituintes da bomba e da tubulação. Segundo Ribeiro (1999), alguns cálculos têm mostrado que o colapso rápido de bolhas produzem ondas de choque com altíssimas pressões, da ordem de 400 MPa (60 000 psi). Essa exposição a forças tão elevadas pode produzir deformação plástica em muitos metais. A aparência dos danos causados pela cavitação é semelhante à corrosão por *pitting*, exceto quando as áreas atingidas por *pitting* têm pequenos espaçamentos tornando a superfície exposta mais rugosa em comparação com a cavitação. Os danos causados pela cavitação são atribuídos à corrosão e também à erosão. Assume-se que as bolhas de vapor em colapso destroem gradativamente a camada protetora da superfície metálica o que resulta em um aumento da corrosão.

Segundo Alcover Jr. e Pukasiewicz (2012) e Mesa *et al.* (2010), o desgaste causado pelo fenômeno da cavitação compreende várias etapas resumindo-se a quatro fases distintas: incubação, em que a perda de massa é mínima devido somente a pequenas alterações superficiais; acumulação, em que a taxa de perda de massa aumenta devido à deformação plástica dando origem ao desprendimento do material; atenuação, na qual ocorre o decréscimo da taxa de perda de massa, devido à alta rugosidade desenvolvida pelo fenômeno, que absorve a energia gerada no processo, diminuindo assim a taxa de erosão; e estabilidade, sendo a fase onde a taxa de erosão torna-se constante, pois há um equilíbrio entre a energia obtida pela superfície rugosa e a energia que causa a perda de massa. A Figura 20

apresenta uma carcaça de uma bomba centrífuga em ferro fundido, retirada de uma ETA para manutenção, a qual contém diversas áreas corroídas provocadas pela cavitação.



Figura 20 - Corrosão causada pela ação da cavitação em carcaça de bomba centrífuga de ferro fundido
Fonte: Autor (2014).

As áreas contidas pela forma de elipses apresentam um estágio mais avançado de corrosão, enquanto que a área retangular apresenta estágios iniciais de corrosão. A Figura 21 apresenta áreas erodidas pela ação da cavitação.

Um sistema de bombeamento operando por certo tempo com a ocorrência do fenômeno de cavitação pode apresentar sérios danos em seus componentes. Com relação à carcaça apresentada, o rotor não apresentou avarias decorrentes da cavitação, devido ao material ao qual é composto, aço inoxidável. Porém, a carcaça de ferro fundido já fora anteriormente reparada devido à erosão por cavitação. Alcover Jr. e Pukasiewicz (2012) avaliaram a resistência à cavitação em três diferentes tipos de aço, sendo eles o aço inoxidável martensítico ASTM CA6NM, o aço inoxidável austenítico ABNT 304 e o aço carbono ABNT 1045. Os autores utilizaram o ensaio de cavitação acelerada ASTM G32, método indireto.

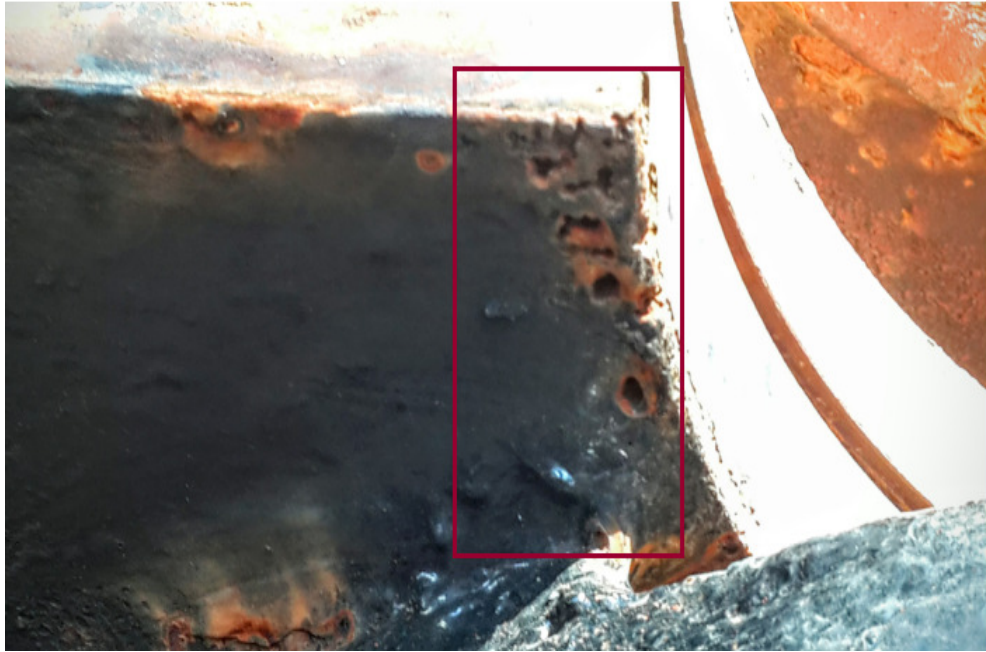


Figura 21 – Erosão causada pela ação da cavitação em carcaça de bomba centrífuga de ferro fundido.

Fonte: Autor (2014).

Concluiu-se que o aço inoxidável austenítico ABNT 304 foi o que apresentou maior resistência à cavitação apresentando uma menor taxa de perda de massa, seguido pelo aço inoxidável martensítico ASTM CA6NM e aço carbono ABNT 1045.

3.8 Critérios Teóricos

3.8.1 Índice de Cavitação Incipiente ou Sigma Crítico (σ_c)

O índice “sigma crítico” representa o valor ao qual a cavitação é incipiente. Sua determinação depende de fatores relativos ao projeto da máquina utilizada, tais como a velocidade de rotação, rotação específica, vazão e altura manométrica de trabalho. É obtido por meio de fórmulas empíricas, resultado de um enorme número de ensaios com bombas centrífugas radiais, lentas e normais. Segundo Gomes (2009) essa fórmula empírica é expressa por:

$$\sigma_c = k \times N_q^{4/3} \quad (5)$$

em que:

k = é um coeficiente dependente do tipo de bomba

N_q = velocidade específica

Alguns autores formularam equações para representá-lo, sendo eles ESCHER WYSS (1956), MACINTYRE (1982), PORTO (2006), STEPANOFF (1961), WIDDERN (1936) e WISLICENUS (1956). A equação Essas equações apresentam-se descritas abaixo.

$$\text{ESCHER WYSS} \quad \sigma_c = 0,001224 \times N_q^{4/3} \quad (6)$$

$$\text{MACINTYRE} \quad \sigma_c = 0,0011 \times N_q^{4/3} \quad (7)$$

$$\text{PORTO} \quad \sigma_c = 0,0002 \times N_s^{4/3} \quad (8)$$

$$\text{STEPANOFF} \quad \sigma_c = 0,00121 \times N_q^{4/3} \quad (9)$$

$$\text{WIDDERN} \quad \sigma_c = 0,001202 \times N_q^{4/3} \quad (10)$$

$$\text{WISLICENUS} \quad \sigma_c = 0,00103 \times N_q^{4/3} \quad (11)$$

em que:

N_s = rotação específica

Segundo Porto (2006) e Marchegiani (2006) quando o parâmetro Número de Thoma (σ) for menor que Sigma Crítico (σ_c) os efeitos da cavitação poderão ser sentidos, ou seja, estará ocorrendo à cavitação.

$$\sigma < \sigma_c \quad (12)$$

3.8.2 Número de Thoma (σ)

O número de Thoma (σ) é um coeficiente adimensional usado nos estudos em máquinas hidráulicas para verificar a possibilidade, ou grau, do fenômeno de cavitação. Segundo Coelho (2006), quanto maior for (σ) menor será a possibilidade da ocorrência da cavitação. Se o número de Thoma diminui por decréscimo da pressão estática ou por aumento da velocidade do escoamento, o fenômeno passa a ter uma maior probabilidade de ocorrência. Segundo Porto (2006) e Marchegiani (2006), a equação a seguir apresenta a relação pertinente a este parâmetro.

$$\sigma = \frac{NPSH_d}{H} \quad (13)$$

em que:

$NPSH_d$ = energia disponível com que o líquido acessa o bocal de entrada da bomba

H = altura manométrica

Quando a pressão no ponto estudado é muito próxima da pressão de vapor do líquido em questão, o σ tende a zero ($p \cong p_v, \rightarrow \sigma \cong 0$), ou seja, há uma maior probabilidade de cavitação.

3.8.3 Velocidade específica (N_q) e Rotação específica (N_s)

Este parâmetro é relativo ao projeto da bomba pode ser melhor apresentado por meio de um exemplo. Segundo Yedidiah (1996), supondo a existência da necessidade de bombear uma vazão de água de 227 m³/h para entregar a uma altura de 60 m. Devido à cavitação na entrada da bomba, a velocidade não pode ultrapassar um determinado limite, independente da velocidade de funcionamento da bomba. Então, para essa vazão, um rotor com diâmetro inferior a 4 polegadas é raramente encontrado. O diâmetro exterior da hélice é escolhido com base na energia a ser alcançada, por exemplo, para alcançar uma energia de 60 m, o rotor operando a 1.770 rpm necessita de um diâmetro exterior de cerca de 16 polegadas.

Para uma rotação de 3560 rpm, o rotor pode alcançar a mesma energia com um diâmetro exterior de apenas 8 polegadas.

A potência transmitida a partir de uma lâmina para o líquido, não só depende de sua forma e velocidade periférica da lâmina, mas também de sua área. Percebe-se, então, que o projeto e o desempenho de uma bomba são muito dependentes em relação a sua velocidade de operação, vazão para a qual tenha sido projetada, e a energia a ser desenvolvida. A equação a seguir apresenta sua relação.

$$N_q = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (14)$$

em que:

n = rotação (rpm)

Q = vazão (m^3/s)

H = altura manométrica (m)

Segundo Porto (2006), a velocidade específica (N_s) é obtida pela seguinte equação:

$$N_s = 3,65N_q \quad (15)$$

3.8.4 Avaliação dos NPSH's e da Cavitação com a Variação da Rotação

A utilização de bombas com velocidade variável está tornando-se uma prática cada vez mais comum na indústria de distribuição de água, substituindo bombas de velocidade fixa convencionais. Enquanto o principal benefício é a redução do consumo e dos custos de energia elétrica, existem outras vantagens significativas, incluindo a redução da vazão de vazamento (LINGIREDDY, 1998).

O uso de velocidade constante em bombas para sistemas de distribuição, muitas vezes resulta em situações em que a pressão pode ser significativamente maior que a necessária. Em algumas ETA's é observada a prática de fechamento de registros a montante do conjunto motobomba, para promover a redução da vazão,

ao passo que seria uma atitude mais prudente a redução da velocidade de operação da bomba. Dessa forma, haveria economia no consumo de energia elétrica, e menor risco de indução do sistema à cavitação.

O projeto de redes de distribuição de água ideal com todos os seus diferentes componentes de rede, é uma tarefa desafiadora, pois deve satisfazer condições operacionais específicas, incluindo restrições de pressão sob múltiplas cargas. Poucos trabalhos foram reportados na literatura sobre um modelo ideal de bombeamento de água para redes de distribuição com armazenamento (PRASAD, 2010).

Segundo Nazif *et al.* (2010), a otimização de sistemas de distribuição de água tem sido investigada por mais de 30 anos e pode ser amplamente classificada em duas áreas de aplicação: projeto e operação. O acompanhamento por eles realizado em Teerã, no Irã, mostrou um potencial de redução em mais de 30% nos vazamentos da rede de distribuição, utilizando um modelo de otimização para o nível do reservatório.

3.9 Eficiência Energética

As alterações climáticas, as questões energéticas e a preocupação com a emissão de gases nocivos a atmosfera, têm aumentado a importância da eficiência energética como área de pesquisa nos últimos anos no Brasil. A melhoria da eficiência energética, ou seja, a utilização eficiente dos recursos disponíveis possibilita a redução de impactos ambientais e custos. Segundo Corcoran, Coughlan e McNabola (2013) o fornecimento e tratamento de água são processos excessivamente energéticos resultando em grandes quantidades de emissão de gases com efeito estufa, bem como incorrer em altos custos. No Reino Unido, a companhia de saneamento é a quarta maior consumidora de energia da indústria, sendo responsável por 5 milhões de toneladas de emissões de gases de efeito estufa por ano. Os governos e os prestadores de serviços de saneamento em todo o mundo reconhecem a necessidade de sistemas de abastecimento de água mais sustentáveis, ou seja, mais eficientes.

Portanto, prevê-se que a eficiência energética é um importante fator competitivo para o desenvolvimento de uma economia global sustentável, tanto social, ética, econômica e ambiental. A ELETROBRAS com o seu programa PROCEL SANEAR têm evidenciado que a eficiência energética pode colaborar efetivamente para a redução dos custos das empresas prestadoras de serviços de saneamento, colaborando para menores tarifas de água, esgoto e energia para sociedade, acelerando o processo de universalização de ambos os serviços (ELETROBRAS PROCEL, 2005).

De acordo com dados fornecidos pelo relatório anual da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a parcela de consumo de energia correspondente ao setor de saneamento é de 3,2% do total da energia elétrica consumida no país. A Figura 22 apresenta um gráfico construído a partir dos dados fornecidos pela EPE.

Figura 22 - Consumo de energia por classe, dados da EPE referentes ao ano de 2013.
Fonte: EPE (2014).

A Companhia de Saneamento de São Paulo (Sabesp) é a empresa que mais consome energia elétrica no Estado de São Paulo, com um valor de referência de cerca de 3% de toda a energia faturada no Estado. Analisando detalhadamente as componentes do consumo, constata-se que 90% do valor por ela consumido resultam da operação dos conjuntos motobomba, 7,5% com encargos de serviços auxiliares e os restantes 2,5% com despesas de iluminação (ALMEIDA, 2010). Segundo Ramos e Ramos (2010) há não muito tempo atrás, o custo de energia em

sistemas de abastecimento de água ou em uma instalação de bombeamento de água, não era a principal preocupação do projetista na concepção de um projeto. No entanto, os recentes aumentos no preço de combustíveis fósseis levaram a um aumento nas tarifas de energia. Por esta razão, as empresas de saneamento estão tentando reduzir a necessidade de energia em seus sistemas de abastecimento.

O relatório PROCEL SANEAR (2015) apresenta os resultados da parceria realizada com a ELETROBRAS e Rede LENHS. Os diagnósticos hidroenergéticos realizados em 2014 com 3 empresas de saneamento, apontaram um potencial de economia de energia de $1,56 \times 10^6$ kWh/ano, redução de demanda na ponta de $0,5 \times 10^6$ kW/ano e de redução de perdas reais de água de $2,12 \times 10^6$ m³ /ano. Com relação ao programa no geral, estima-se com informações de mercado e aplicação de metodologias específicas para avaliação de resultados, que em 2014 o PROCEL alcançou um resultado de economia de energia de aproximadamente 10.517 bilhões de kWh. Essa energia economizada pode ser convertida em emissões evitadas de 1.425 milhão tCO₂ equivalentes, o que corresponde às emissões proporcionadas por 489 mil veículos durante um ano (PROCEL, 2015).

Segundo o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID, 2011), a adoção de medidas de economia de energia inclui: avaliações de eficiência, cálculo de perdas para obtenção de balanços específicos para cada sistema, cálculo de indicadores energéticos, elaboração de balanços de energia e análises da operação do sistema. A Figura 23 apresenta um diagrama simplificado do balanço de energia de um SAA. Em cada mudança de etapa, representada nessa figura, em que há algum tipo de perda, existe ali potencial de economia.

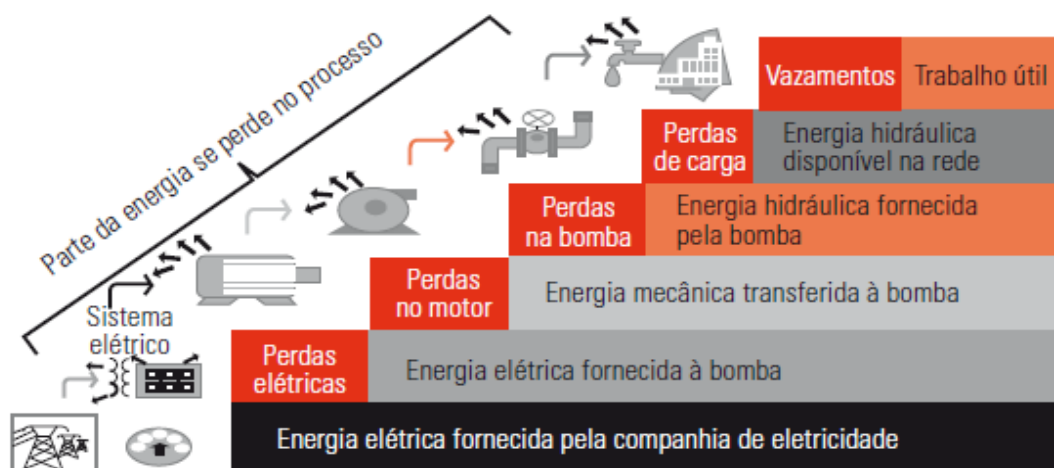


Figura 23 - Diagrama simplificado do balanço de energia em um SAA.
 Fonte: BID (2011).

Cada sistema possui suas particularidades, segundo o BID (2011), podem-se elencar medidas dentre as propostas de medidas para a economia, são elas: economia em tarifas de fornecimento, redução de perdas nas instalações elétricas, melhoria da eficiência em motores elétricos, melhoria da eficiência em bombas, redução de perdas mecânicas, redução de vazamentos de água e perdas de carga, melhoria da operação do sistema, melhoria da manutenção, inclusão de novas fontes de energia, mudanças nas tecnologias utilizadas e aproveitamento de energias residuais.

Marcolin e Robaina (2002) estudando o consumo de energia elétrica em estações elevatórias observaram que a substituição de bombas centrífugas antigas, pode gerar uma economia significativa, pois foi observada a utilização de máquinas com tempo de operação superior a 20 anos. A substituição por máquinas com rendimentos próximos a 80% poderia impactar em uma economia de até 44% no consumo de energia elétrica. Constataram ainda que em 67% dos casos por eles avaliados, as bombas operavam abaixo do rendimento aceitável que seria de 75%.

O custo da energia usada para bombear a água constitui uma grande porção das despesas operacionais para uma concessionária de saneamento. Medidas de economia de energia em sistemas de abastecimento de água podem ser realizadas por diferentes caminhos, entre eles, por um projeto de sistema energeticamente eficiente, por manutenção adequada de equipamentos, especialmente bombas e por

um excelente controle do sistema. O custo de bombeamento é um produto do consumo de energia pela tarifa da energia elétrica.

Segundo Abdelmeguid e Ulanicki (2010), o custo com energia pode ser reduzido por meio do bombeamento de vazões menores de água, baixando assim a energia de pressão a qual a água é bombeada e operando bombas próximas a sua máxima eficiência. A programação do bombeamento em períodos em que a tarifa energética seja menor, ou seja, fora do horário de ponta também pode minimizar custos operacionais com energia elétrica.

Cada sistema de abastecimento de água tem as suas próprias características considerando-se a topografia da região, extensão de rede, população abastecida, sazonalidade, etc. Assim, o aumento aparente do consumo de energia não é necessariamente resultado de um declínio na eficiência do sistema, o que torna difícil a comparação entre sistemas. Por esta razão, a utilização de indicadores é fundamentalmente importante para a realização dessa comparação (LIMA *et al.*, 2015).

Os indicadores são medidas da eficiência e eficácia de um sistema de abastecimento de água potável (BID, 2011). Embora exista uma grande quantidade de indicadores, no cenário da eficiência energética sob exame, propõe-se o acompanhamento de no mínimo os seguintes:

- Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (CE) (kWh/m³).
- Índice de consumo de energia normalizado (CEN) (kWh/(m³/100m)).

3.9.1 Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (CE)

Esse indicador representa a relação entre a energia utilizada pelos equipamentos de bombeamento em um sistema de abastecimento de água, para produzir o volume total de água a ser fornecido pela rede de distribuição. A energia utilizada é determinada utilizando-se os dados do histórico de consumo de energia

elétrica, apresentado nas notas fiscais pela companhia local de distribuição de energia elétrica. Os consumos em quilowatts-hora (kWh) de cada equipamento de bombeamento do sistema são somados pelo período correspondente. Para o período correspondente, é calculado o volume de água produzido, expresso em metros cúbicos (m³). Então, calcula-se o CE, dividindo-se o total dos quilowatts-hora consumidos em um determinado período, pelo o volume total de água produzido nas captações do sistema de abastecimento em questão.

$$CE = \frac{\text{Consumo total de energia elétrica no SAA (kWh)}}{\text{Volume total de água produzido (m}^3\text{)}} \quad (16)$$

3.9.2 Índice de consumo de energia normalizado (CEN)

Segundo Alegre *et al.* (2004), esse indicador é definido como a quantidade média de energia necessária para elevar a 100 metros de altura manométrica a quantidade de 1 metro cúbico de água. Tem como objetivo solucionar as limitações do indicador consumo energético específico (CE), permitindo assim, a comparação entre sistemas com características diferentes.

Esse indicador representa o custo específico por unidade de energia consumida, que depende de fatores tais como o tipo de tarifa elétrica contratada, o fator de carga e fatores que incidem sobre o faturamento energético, como a punição ou bonificação pelo fator de potência da instalação.

Então, esse indicador é calculado com base em uma estatística de consumo e faturamento energético anual coletado pela empresa de água e saneamento, bem como a produção anual de água potável.

$$CEN = \frac{\text{Consumo de energia no período de referência (kWh)}}{\text{Vol. bombeado no período (m}^3\text{) x Altura manométrica } \left(\frac{\text{m}}{100 \text{ m}}\right)} \quad (17)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Eficiência Energética em Hidráulica e Saneamento (LENHS) que está localizado no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O estudo foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

- 8.1 Organização do LENHS/UFPR
- 8.2 Ensaio preliminares
- 8.3 Tipos de configurações
- 8.4 Critérios de seleção para o NPSH_r
- 8.5 Critérios de seleção para o índice de cavitação incipiente (σ_c)
- 8.6 Metodologia utilizada para o cálculo numérico

4.1 Organização do LENHS/UFPR

O LENHS/UFPR dispõe de uma infraestrutura com potencial de simulação em escala reduzida de sistemas elevatórios e sistemas de distribuição de água, nas mais variadas práticas de interesse. As instalações que representam os sistemas elevatórios são compostas por reservatórios, linhas de adução em tubos de aço galvanizado, conjuntos motobomba em diferentes arranjos e medidores de vazões e de pressões.

Neste estudo, um dos objetivos específicos é a avaliação da cavitação, observando-se o seu efeito sobre o comportamento dos NPSH's e, conseqüentemente o impacto sobre a eficiência do conjunto. No entanto, nas instalações originais do LENHS/UFPR não havia a ocorrência de cavitação. Então, foram instalados controles de vazão (registros de gaveta) na sucção de cada bomba, possibilitando a indução de cavitação ao sistema.

Para o monitoramento da energia de pressão na região de entrada da bomba e produzida pelo conjunto, foram instalados transdutores de pressão a montante do conjunto motobomba (faixa de medição de -10 até 10 mca) e a jusante (faixa de medição de -10 até 80 mca), substituindo os antigos medidores de pressão que

atingiam faixas de medições insuficientes (0 até 30 mca), para as pressões alcançadas nesse estudo.

Após a calibração e devida verificação do funcionamento dos equipamentos, foram realizados ensaios preliminares.

4.2 Ensaios Preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados com o intuito de verificar a ocorrência da cavitação por meio de sinais físicos, tais como, ruído, vibração e pressões relativas negativas a montante próximas a -8,50 mca. Verificou-se também os programas utilizados para o registro dos parâmetros de vazão, de pressão e dos dados elétricos, tais como corrente elétrica, tensões elétricas mínima e máxima, potência elétrica ativa e reativa.

Na condução dos experimentos, foram estabelecidas duas condições de ensaios denominadas “normal” (sem cavitação) e de “indução de cavitação”. Na condição “normal” de operação o registro a montante foi operado totalmente aberto para garantir a ausência de cavitação. Já na condição de “indução de cavitação” houve regulagem gradual do registro em questão com o intuito de gerar condições de cavitação.

Isto posto, para o desenvolvimento dos ensaios, inicialmente, os conjuntos motobomba foram configurados para os parâmetros de funcionamento semelhantes aos indicados pelo fabricante, ou seja, condições nominais. Por exemplo, para as configurações 1 e 2, que serão detalhadas a seguir, a vazão foi regulada próxima a 10 m³/h, e a frequência de rotação do motor em 100% (60 Hz). O sistema foi mantido em funcionamento por aproximadamente 5 minutos, sendo os resultados das medições de vazão, pressão e dados elétricos citados acima, simultaneamente registrados em plataforma computacional. Os ensaios foram conduzidos de forma similar para as demais configurações, respeitando suas características nominais.

Na sequência, os ensaios foram realizados variando o percentual de frequência de rotação do motor, com o auxílio de um conversor de frequência. As faixas de variação de frequência partiram de 100% (60 Hz) até 50% (30 Hz),

seguindo a orientação do fabricante, o qual recomenda indica não operar com rotações inferiores a metade da rotação plena. Assim, para cada faixa de frequência foram realizados 4 ensaios para a condição “normal” e 4 ensaios para a condição de “indução de cavitação”.

4.3 Tipos de Configurações

Após os ensaios preliminares, este trabalho foi dividido em 4 configurações detalhadas a seguir. Para cada tipo de configuração foram realizados ensaios utilizando os procedimentos apresentados no tópico anterior.

A comparação entre diferentes tipos de associação de bombas foi realizada para analisar se há maior tendência à cavitação, considerando-se arranjos diferentes entre os conjuntos motobomba.

Posteriormente, as configurações foram comparadas aos pares, sendo adotado o modelo de bomba como critério de separação, pois as instalações existentes no laboratório possuem bombas com características diferentes. A Tabela 3 apresenta os tipos de configurações utilizadas.

Tabela 3 - Tipos de configurações

Tipo de Configuração	N° de Bombas	Rotação (rpm)	Tipo de Associação das bombas
Configuração 1	01	3500	Simplex
Configuração 2	02	3500	Série
Configuração 3	02	1750	Paralelo
Configuração 4	02	1750	Série

Fonte: Autor (2015).

4.3.1 Configuração 1

A configuração 1 está inserida em um arranjo com 2 conjuntos motobomba em série, porém somente um dos conjuntos foi acionado durante os experimentos, ou seja, a configuração 1 é composta por 1 conjunto motobomba simples. A Figura

24 apresenta o desenho esquemático do arranjo em série com a localização do conjunto motobomba utilizado para essa configuração.

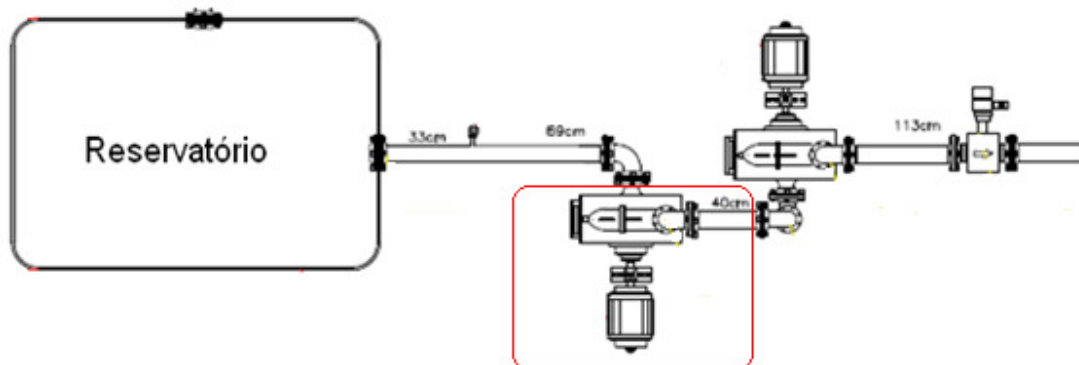


Figura 24 – Desenho esquemático para a configuração 1.
Fonte: Autor (2014).

Nesta instalação foi utilizada 01 bomba centrífuga (modelo INI 32-125.1), cujas características nominais são: vazão (Q) igual a 10 m³/h, altura manométrica (H) igual a 25 mca e rotação nominal do rotor de 3500 rpm.

4.3.2 Configuração 2

A configuração 2 é composta por 02 conjuntos motobomba operando em associação em série, como apresentado na Figura 25.

Para tanto, utilizaram-se 02 bombas centrífugas (modelo INI 32-125.1), vazão nominal (Q) igual a 10 m³/h, altura manométrica (H) igual a 25 mca e rotação nominal do rotor de 3500 rpm.

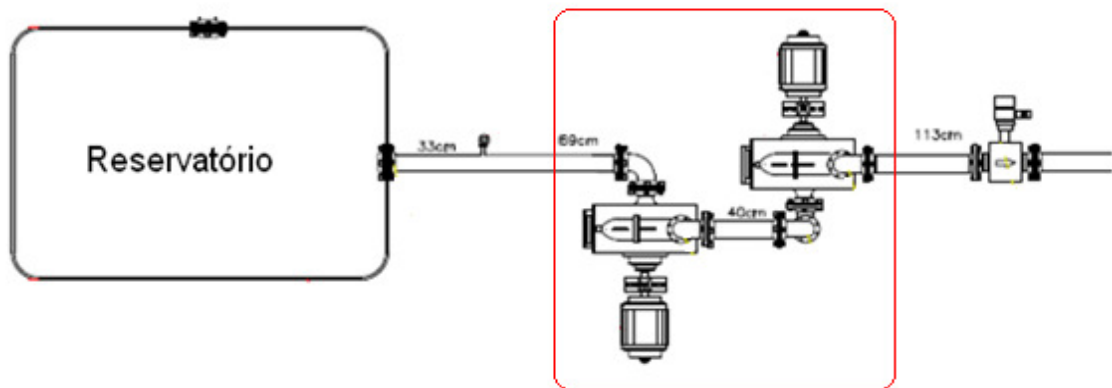


Figura 25 – Desenho esquemático para a configuração 2 (Fonte: Autor, 2014).

A Figura 26 apresenta uma fotografia do arranjo utilizado no para as configurações 1 e 2.



Figura 26 – Fotografia do arranjo experimental utilizado no LENHS/UFPR para as configurações 1 e 2
Fonte: Autor (2015).

4.3.3 Configuração 3

A configuração 3 é composta por 02 conjuntos motobomba operando em associação em paralelo. A Figura 27 apresenta o desenho esquemático das instalações utilizadas para os ensaios referentes a esta configuração.

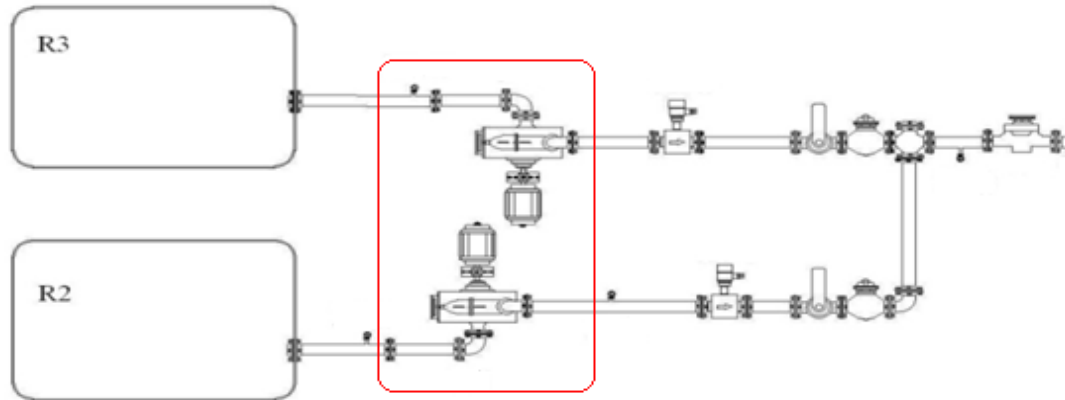


Figura 27 – Desenho esquemático para a configuração 3 .
Fonte: Autor (2014).

O arranjo é composto por 02 bombas centrífugas (modelo INI 32-125), cujas características nominais são vazão (Q) igual a 14 m³/h, altura manométrica (H) igual a 6 mca e rotação nominal do rotor de 1750 rpm. A Figura 28 apresenta uma fotografia do arranjo utilizado para essa configuração.

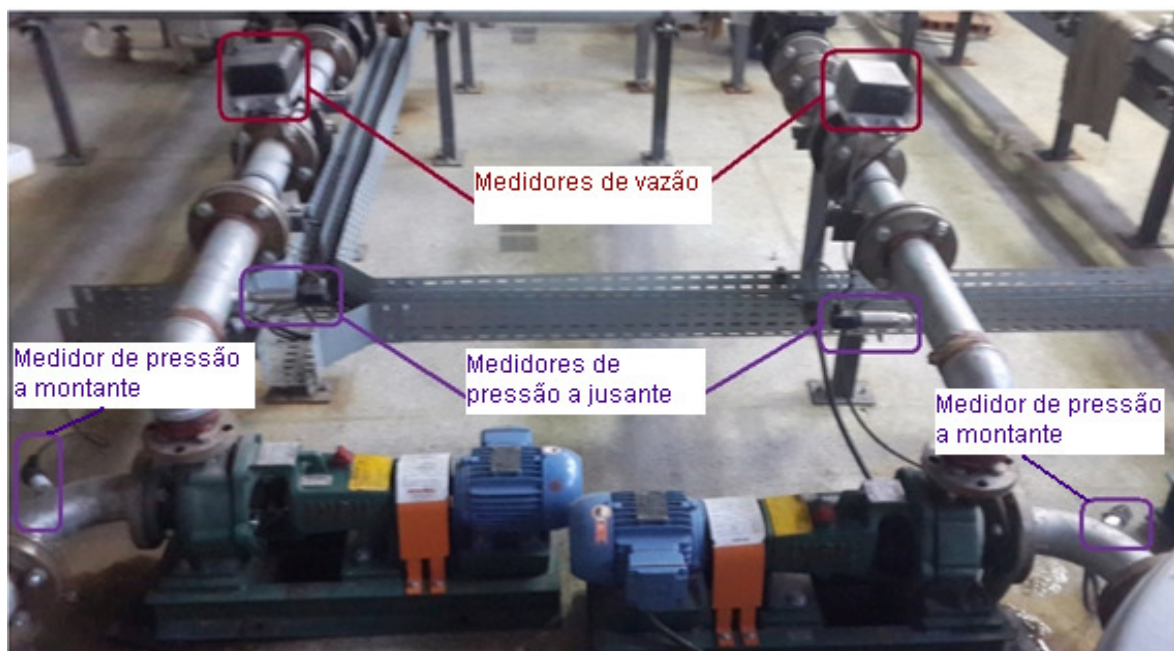


Figura 28 – Fotografia do arranjo utilizado no LENHS/UFPR para a Configuração 3.
(Fonte: Autor (2015)).

4.3.4 Configuração 4

A configuração 4 é composta por 02 conjuntos motobomba operando em associação em série. A Figura 29 apresenta o desenho esquemático para a instalação utilizada.

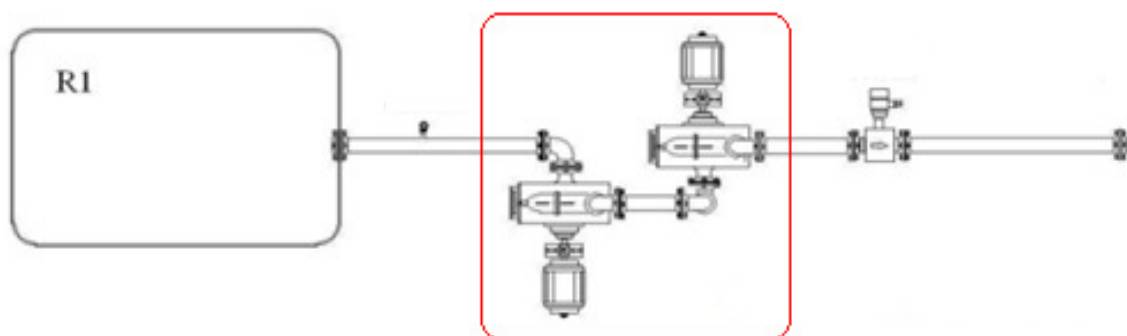


Figura 29 – Desenho esquemático da instalação utilizada para a configuração 4 .
Fonte: Autor (2014).

Para esta instalação foram utilizadas 02 bombas centrífugas (modelo INI 32-125), cujas características nominais são vazão (Q) igual a 14 m³/h, altura manométrica (H) igual a 6 mca e rotação nominal do rotor de 1750 rpm. A Figura 30 apresenta uma fotografia do arranjo utilizado para essa configuração.

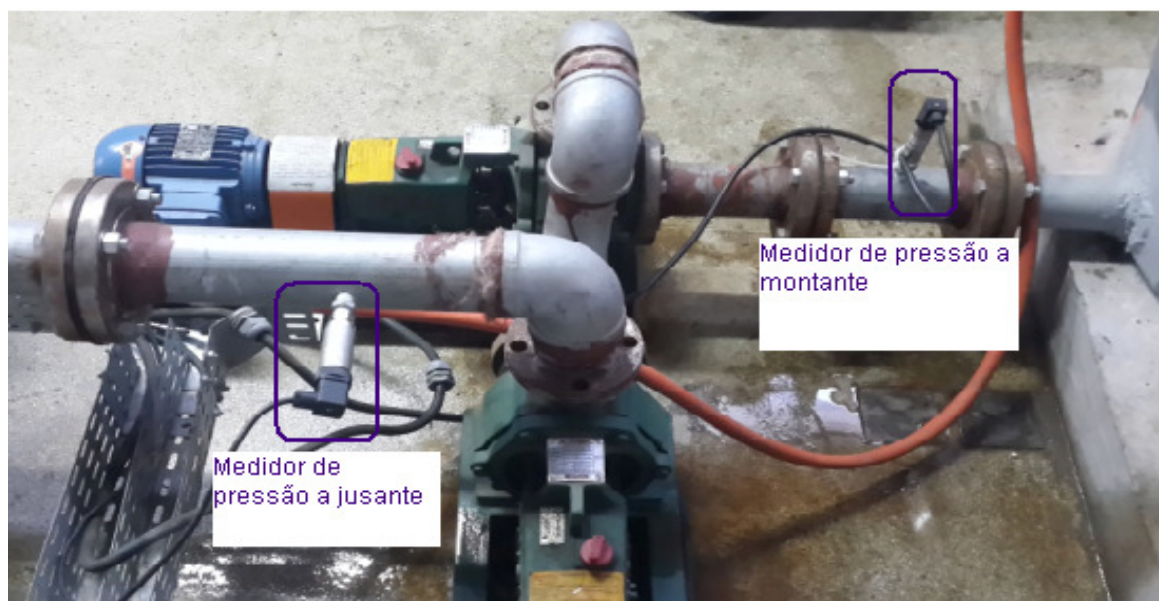


Figura 30 – Fotografia do arranjo utilizado no LENHS/UFPR para a configuração 4.
Fonte: Autor (2015).

4.4 Critérios de seleção para o NPSH_r

Neste trabalho analisaram-se propostas de alguns autores para o cálculo de NPSH_r, quando não se dispõe de informações do fabricante. Dessa maneira, pode-se adotar um critério para a estimativa de NPSH_r.

Primeiramente, analisou-se a equação proposta no gráfico da Figura 15 de Yedidiah (1996) aplicada as configurações 1 e 2, ao qual pôde-se conseguir uma boa aproximação por meio da equação apresentada no gráfico e reescrita abaixo.

$$\text{NPSH}_r = 0,67Q_n^{0,424} \quad (18)$$

em que:

Q_n = vazão nominal (m³/h)

Para a análise das configurações 3 e 4, utilizou-se o gráfico da Figura 14 correspondente a rotação de 1750 rpm, o qual apresenta a seguinte equação.

$$\text{NPSH}_r = 0,34Q_n^{0,424} \quad (19)$$

Então, aplicaram-se as equações características nominais da bomba correspondente. Como o enfoque deste trabalho é a variação da rotação, com o resultado da estimativa de NPSH_r para as características nominais, foi possível dar início a esta variação. A partir do NPSH_r para a rotação plena e conhecida a velocidade de rotação, é possível estabelecer relações matemáticas. Segundo Silva (2002) pode-se estimar vários parâmetros diferentes utilizando-se relação de semelhança apresentada na seguinte equação.

$$\text{NPSH}_{rni} = \text{NPSH}_{rn1} \times \left(\frac{n_i}{n_1}\right)^2 \quad (20)$$

em que:

n_1 = rotação plena (rpm)

n_i = rotação para a faixa analisada (rpm)

NPSH_{rn1} = energia requerida pela bomba para a rotação plena

$NPSH_{rni}$ = energia requerida pela bomba para a rotação analisada

Após, realizou-se uma análise por meio da escolha de fabricantes com boas referências de mercado. As rotações variaram entre 1160 rpm, 1750 rpm e 3500 rpm sendo que para cada rotação citada escolheu-se um modelo de bomba. As bombas foram selecionadas com vazão igual ou próxima, a vazão nominal das bombas utilizadas nos experimentos. A seleção do número de bombas, rotação e vazão estão apresentadas na Tabela 4, a qual também apresenta os critérios utilizados para a comparação com Yedidiah (1996) e o Fornecedor.

Tabela 4 – Critérios para análise de NPSHr pela bomba.

Análise	N° de Bombas	Vazão (m³/h)	Rotação (rpm)
Fornecedor (1)	1	10	3500
Yedidiah (2)	1	10	3500
Rotação Variada (3)	3	20	1160-3500
Rotação Fixa (4)	15	10	3500
Rotação Variada (5)	45	10	1160-3500

Fonte: Autor (2015).

Para o caso particular deste estudo, o parâmetro $NPSH_d$ foi mensurado utilizando a seguinte equação.

$$NPSH_d = p_a + (p_{sucção} + \frac{v^2}{2g}) \quad (21)$$

em que:

p_a = pressão atmosférica (mca)

$p_{sucção}$ = pressão relativa medida pelo transdutor no ponto de interesse (mca)

v = velocidade do escoamento (m/s)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

Por meio desta fórmula transforma-se a energia real medida no ponto de interesse em energia de pressão absoluta.

Diante dos valores dos parâmetros de NPSH há condições de verificar-se os aspectos de cavitação, adotando-se como critério a formulação apresentada na equação 23.

$$\text{NPSH}_d \leq \text{NPSH}_r \quad (22)$$

4.4.1 Critérios de seleção para o índice de cavitação incipiente (σ_c)

De acordo com a revisão bibliográfica, há algumas propostas de equação para o cálculo de σ_c . Então, elaborou-se uma análise referente às equações anteriormente apresentadas para o cálculo do índice de cavitação incipiente (sigma crítico) em bombas centrífugas.

Primeiramente, analisaram-se as equações apresentadas para σ_c . Após definiu-se a equação que apresentou o melhor resultado para este critério. Após o cálculo do número de Thoma (σ), por meio da equação 14, fez-se a comparação apresentada na equação 13.

A partir dessas equações elaborou-se um quadro comparativo ao qual a vazão e altura foram mantidas constantes para as condições nominais das bombas utilizadas nas Configurações 1 e 2, variando-se apenas a rotação.

4.4.2 Metodologia utilizada para o cálculo numérico

Os dados resultantes dos ensaios foram trabalhados em planilhas elaboradas utilizando-se o programa Microsoft Excel®. A Tabela 5 apresenta o número de dados trabalhados para os diferentes tipos de configurações anteriormente citadas.

Tabela 5 – Número de dados trabalhados para os diferentes tipos de ensaio e configurações

Número de Dados		
Situação	Configuração	
	1	2
Normal	1345	1255
Em situação de Cavitação	180	925

Fonte: Autor (2015).

A variação da velocidade de rotação foi realizada em todos os ensaios. Portanto, para a verificação da velocidade de rotação equivalente a cada faixa de frequência, utilizou-se um dispositivo que mede as rotações por minuto de um motor ou de um eixo, o tacômetro (DT- 6236B). A Tabela 6 apresenta a equivalência entre os diferentes percentuais de frequência avaliados e as respectivas rotações do motor. Cumpre destacar que a redução no percentual da frequência diminui a rotação do motor, ocasionando a modificação das curvas características da bomba, inclusive a curva do NPSH_d.

Tabela 6 – Equivalência entre o percentual de frequência e a rotação do motor (3500 rpm) utilizado nas configurações 1 e 2.

Frequência (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
Rotação (rpm)	3480	3313	3168	3015	2852	2688	2518	2339	2167	1998	1805

Fonte: Autor (2014).

Para os conjuntos motobomba utilizados nas configurações 3 e 4, a Tabela 7 apresenta a Frequência x Rotação.

Tabela 7 – Equivalência entre o percentual de frequência e a rotação do motor (1750 rpm) utilizado nas configurações 3 e 4.

Frequência (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
Rotação (rpm)	1740	1667	1590	1499	1406	1318	1228	1136	1052	966	866

Fonte: Autor (2014).

A partir das grandezas mensuradas nos ensaios foi possível estimar diversas variáveis pertinentes ao estudo como a pressão absoluta (p_{abs}), a altura

manométrica (H), o NPSH_d, o NPSH_r, a potência hidráulica (P_H) e o rendimento (η), cujas equações serão apresentadas a seguir.

Após a verificação da ocorrência de cavitação para a situação de indução nas configurações apresentadas, analisou-se a influência da cavitação sobre o rendimento do conjunto motobomba. Entretanto, para que houvesse critério quanto à análise deste parâmetro, aplicou-se ao rendimento fornecido pelo catálogo do fabricante, uma equação de relação de semelhança. Dessa forma, construiu-se um padrão para a comparação com as demais equações.

$$\eta_i = \eta_1 \left(\frac{n_i}{n_1} \right)^2 \quad (23)$$

em que:

η_i = rendimento para a rotação analisada (%)

η_1 = rendimento para a rotação plena (%)

n_i = rotação para a faixa analisada (rpm)

n_1 = rotação para a faixa de rotação plena (rpm)

Para o cálculo do rendimento obtido com os ensaios, inicialmente calculou-se a potência hidráulica (P_H) fornecida ao sistema, sendo que para este cálculo utilizou-se a equação 2.

Por conseguinte, para a obtenção do rendimento (η) do conjunto motobomba, utilizou-se a equação 25:

$$\eta = \frac{P_H}{Pot_e} \quad (24)$$

em que:

Pot_e = potência elétrica ativa mensurada durante os ensaios para os intervalos analisados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram ordenados de acordo com os critérios e configurações.

5.1 Resultados para a análise dos critérios de NPSH_r

Aplicando-se a variação de velocidade de rotação, por meio da equação 21 ao NPSH_r fornecido pelo catálogo do fabricante, obteve-se a estimativa de NPSH_r para a velocidade de rotação correspondente. Estes foram apresentados na Figura 31. Estes resultados serão utilizados como padrão, para a comparação com os próximos gráficos a ser apresentados.

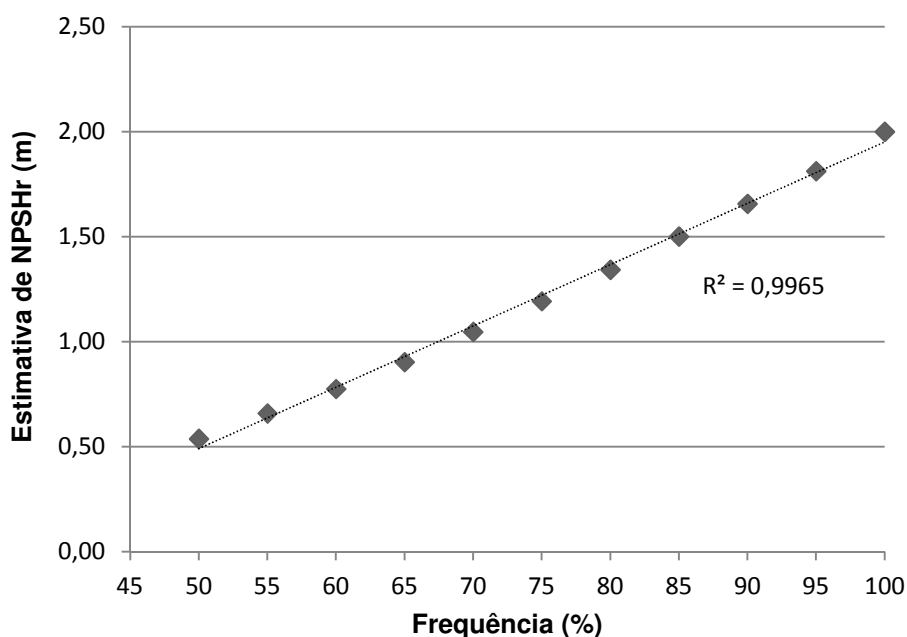


Figura 31 – Gráfico de estimativa de NPSH_r x frequência com NPSH_r Fornecedor (1).
Fonte: Autor (2015).

Na sequência, analisou-se a equação apresentada no gráfico da Figura 15 de Yedidiah (1996), aplicando as características nominais da bomba e variando sua rotação. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 32.

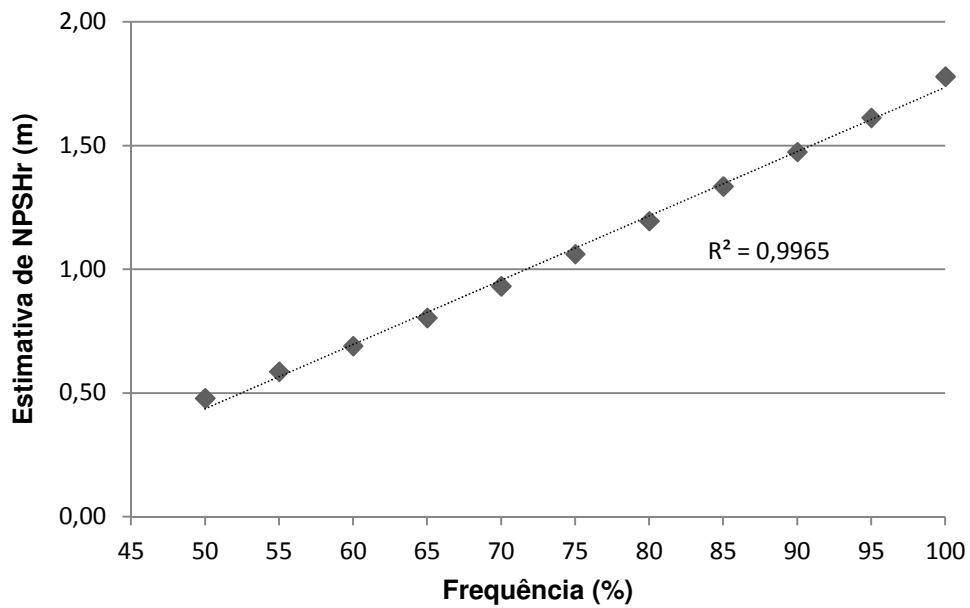


Figura 32 – Gráfico de estimativa de NPSHr x frequência para as características nominais aplicado a equação de Yedidah (1996), 3500 rpm.
 Fonte: Autor (2015).

Para a análise elaborada para bombas selecionadas e com rotações variadas (3), utilizou-se como critério fixar a vazão como 20 m³/h, observando-se a altura total de elevação e NPSH_r resultantes. A Figura 33 apresenta o gráfico obtido para esta análise.

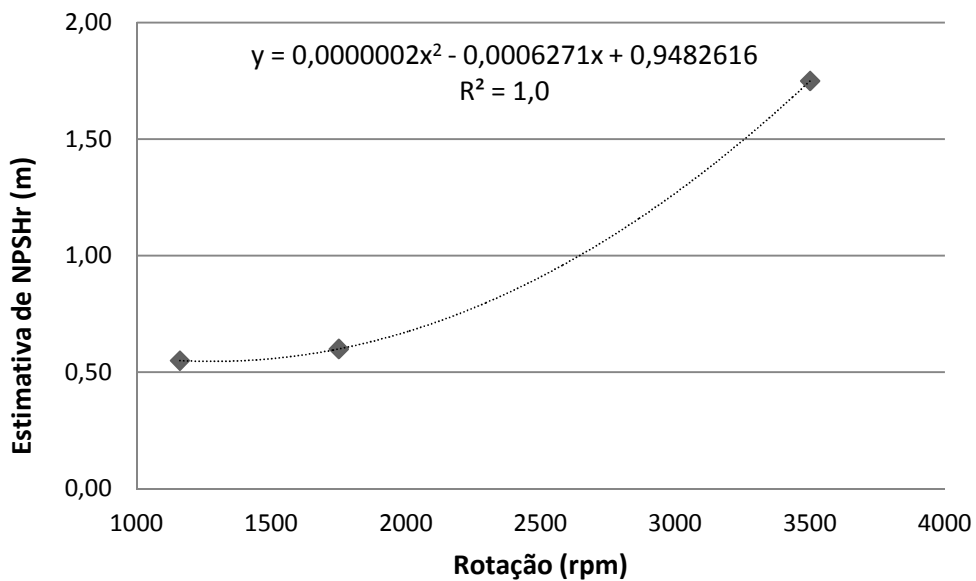


Figura 33 – Gráfico de estimativa NPSHr x rotação para 03 bombas selecionadas, vazão fixa (20 m³/h) e rotação variada
 Fonte: Autor (2015).

Por meio da análise das Figuras 32 e 33, observa-se que há uma queda no $NPSH_r$ à medida que há redução na rotação. Verifica-se por essas estimativas, que a bomba em funcionamento a menores velocidades de rotação, requer menor quantidade de energia para sua operação. Com os baixos valores de $NPSH_r$ verificados nas figuras citadas acima, a possibilidade da energia disponível ser menor que a requerida é pequena. Dessa forma, pode-se supor uma menor tendência a cavitação, visto que um dos critérios para verificação de cavitação é $NPSH_d < NPSH_r$.

A seguir, entre as marcas previamente selecionadas, as quais podem ser verificadas no Apêndice deste trabalho. Escolheram-se 15 modelos com mesma rotação, fixando-se a vazão em $10 \text{ m}^3/\text{h}$ e relacionando a altura total de elevação com o $NPSH_r$. A Figura 34 apresenta o gráfico resultante.

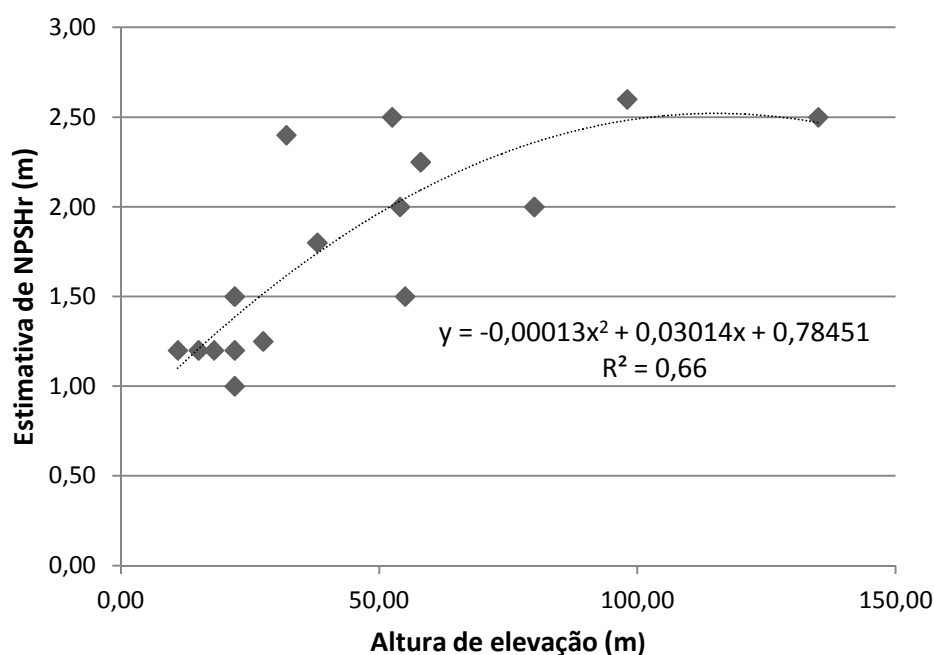


Figura 34 – Gráfico de estimativa de $NPSH_r$ x altura de elevação, rotação (3500 rpm) e vazão fixa ($10 \text{ m}^3/\text{h}$).
Fonte: Autor (2015).

Este gráfico apresenta no seu eixo de abscissas as alturas de elevação, devido à fixação das variáveis rotação e vazão ao selecionar os modelos comerciais,

para que reunissem características nominais iguais as das bombas utilizadas nos experimentos.

Para a análise de rotações variadas (5), aumentou-se o número de modelos entre as marcas previamente selecionadas. Com um total de 45 modelos com rotações de 1160 a 3500 rpm, sendo 15 de cada faixa de rotação, fixando-se a vazão em 10 m³/h e relacionando a altura total de elevação com o NPSH_r. A Figura 35 apresenta o gráfico resultante.

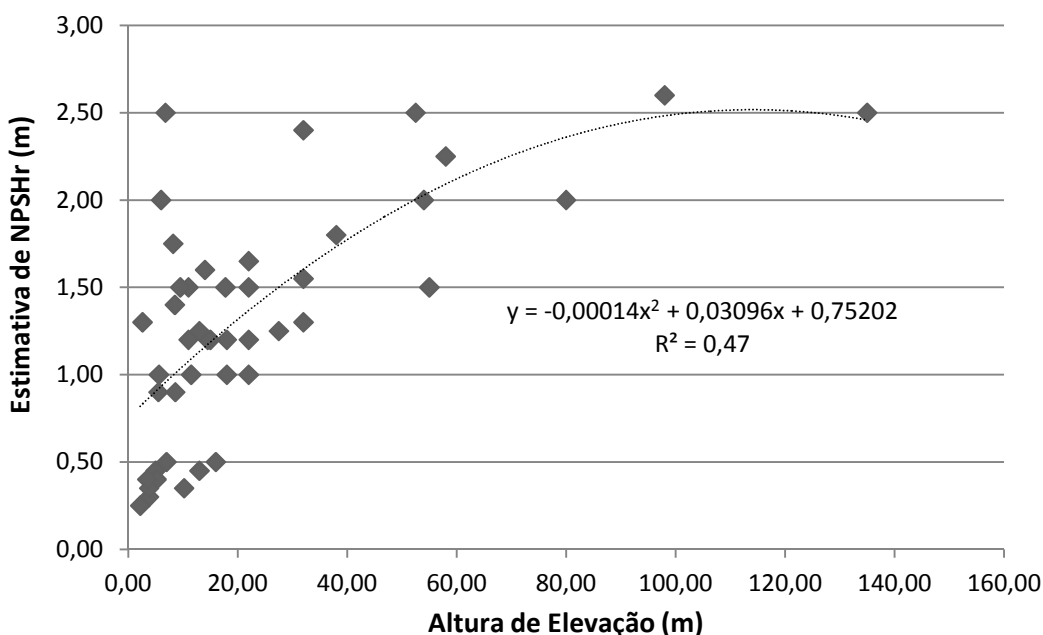


Figura 35 – Gráfico de estimativa de NPSHr x altura de elevação, rotações variadas e vazão fixa (10 m³/h).
Fonte: Autor (2015).

A partir das curvas construídas graficamente, aplicou-se as características nominais das bombas da instalação da configuração 1 e 2 (10 m³/h, 25 mca) a estas equações. Após a construção das análises, calculou-se qual curva apresentou o menor erro em comparação à análise produzida com os dados do Fornecedor (1), ou seja, a reta padrão, para então adotar-se este como critério. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para a comparação.

Tabela 8 – Comparação entre os resultado de NPSH requerido e análise do erro quadrático representado por cada equação.

Freq. (%)	NPSHr Fornec. (1)	NPSHr Eq. Yedidiah (2)	NPSHr 3 bombas, rpm variável (3)	NPSHr 15 bombas, 3500 rpm (4)	NPSHr 45 bombas, rpm variável (5)	Quadrado das diferenças			
						(1-2) ²	(1-3) ²	(1-4) ²	(1-5) ²
100	2,00	1,78	1,73	1,46	1,44	0,05	0,07	0,30	0,32
95	1,81	1,61	1,56	1,32	1,30	0,04	0,06	0,24	0,26
90	1,66	1,47	1,42	1,21	1,19	0,03	0,06	0,20	0,22
85	1,50	1,34	1,28	1,09	1,08	0,03	0,05	0,17	0,18
80	1,34	1,19	1,15	0,98	0,97	0,02	0,04	0,13	0,14
75	1,19	1,06	1,03	0,87	0,86	0,02	0,03	0,11	0,11
70	1,05	0,93	0,92	0,76	0,75	0,01	0,02	0,08	0,09
65	0,90	0,80	0,82	0,66	0,65	0,01	0,01	0,06	0,06
60	0,78	0,69	0,74	0,56	0,56	0,01	0,00	0,04	0,05
55	0,66	0,59	0,67	0,48	0,47	0,01	0,00	0,03	0,03
50	0,54	0,48	0,61	0,39	0,39	0,00	0,01	0,02	0,02
Soma Erro Quadrático						23,0%	33,0%	138,4%	147,8%
Erro Quadrático Médio						2,1%	3,0%	12,6%	13,4%

Fonte: Autor (2015).

Dessa forma, observa-se que a equação proposta por Yedidiah (1996) apresentou o menor erro, como se podia esperar, devido a maior quantidade de bombas utilizadas em seu estudo, seguida pela análise NPSH_r, 3 bombas com rotação variável, a qual apresentou o menor erro. Contudo, os estudos denominados 4 e 5 também podem ser considerados como boas aproximações.

No entanto, esperava-se demonstrar com a elaboração das Figuras 34, 35 e 36 um método simplificado para a estimativa de NPSH_r. De maneira geral, as ETAs em operação no Brasil, têm aproximadamente 20 anos de implantação. Algumas informações podem ser perdidas ao longo do tempo, tais como os catálogos de bombas. A simples construção de um gráfico, utilizando 3 modelos de bombas com rotações diferentes, porém com características nominais similares à bomba em questão, pode apresentar uma boa estimativa de NPSH_r. Este método visa uma aplicação fácil, rápida e com um erro quadrático médio de 3,0%, ou seja, apresentou uma boa aproximação com o NPSH_r real. Com o intuito de facilitar a

verificação das condições de operação, pode ser facilmente aplicado em campo pelos próprios operadores.

Entretanto, para a continuidade deste estudo, adotou-se a equação proposta por Yedidiah (1996) para a estimativa de $NPSH_r$. Por meio deste critério pode-se analisar o comportamento do $NPSH_r$ para todas as configurações respeitando as diferentes rotações, anteriormente apresentadas.

5.2 Resultados para a análise dos critérios de sigma crítico (σ_c)

Para a análise referente à equação 13 comparação entre σ 's, primeiramente, analisou-se as equações apresentadas para σ_c , para então definir qual das equações apresentaria melhor referência para o estudo.

A partir dessas equações, elaborou-se um quadro comparativo ao qual a vazão e altura foram mantidas constantes para as condições nominais das configurações 1 e 2, variando-se apenas a rotação. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 9 – Comparação entre os sigmas críticos com variação da rotação.

Freq. de Rotação (%)	Velocidade Específica (Nq)	(σ_c) Escher Wyss	(σ_c) Macintyre	(σ_c) Porto	(σ_c) Stepanoff	(σ_c) Widdern	(σ_c) Wislicenus
100	16,40	0,0510	0,0459	0,0469	0,0504	0,0501	0,0429
95	15,62	0,0478	0,0429	0,0439	0,0472	0,0469	0,0402
90	14,93	0,0450	0,0405	0,0413	0,0445	0,0442	0,0379
85	14,21	0,0421	0,0379	0,0387	0,0417	0,0414	0,0355
80	13,44	0,0391	0,0352	0,0359	0,0387	0,0384	0,0329
75	12,67	0,0362	0,0325	0,0332	0,0357	0,0355	0,0304
70	11,87	0,0331	0,0298	0,0304	0,0328	0,0325	0,0279
65	11,03	0,0300	0,0270	0,0276	0,0297	0,0295	0,0253
60	10,22	0,0271	0,0244	0,0249	0,0268	0,0266	0,0228
55	9,42	0,0243	0,0219	0,0224	0,0241	0,0239	0,0205
50	8,51	0,0213	0,0191	0,0195	0,0210	0,0209	0,0179

Fonte: Autor, 2015).

Com os resultados obtidos apresentados na Tabela 9, construiu-se o gráfico apresentado na Figura 36 para melhor observação do comportamento dos sigmas críticos analisados com a variação da rotação.

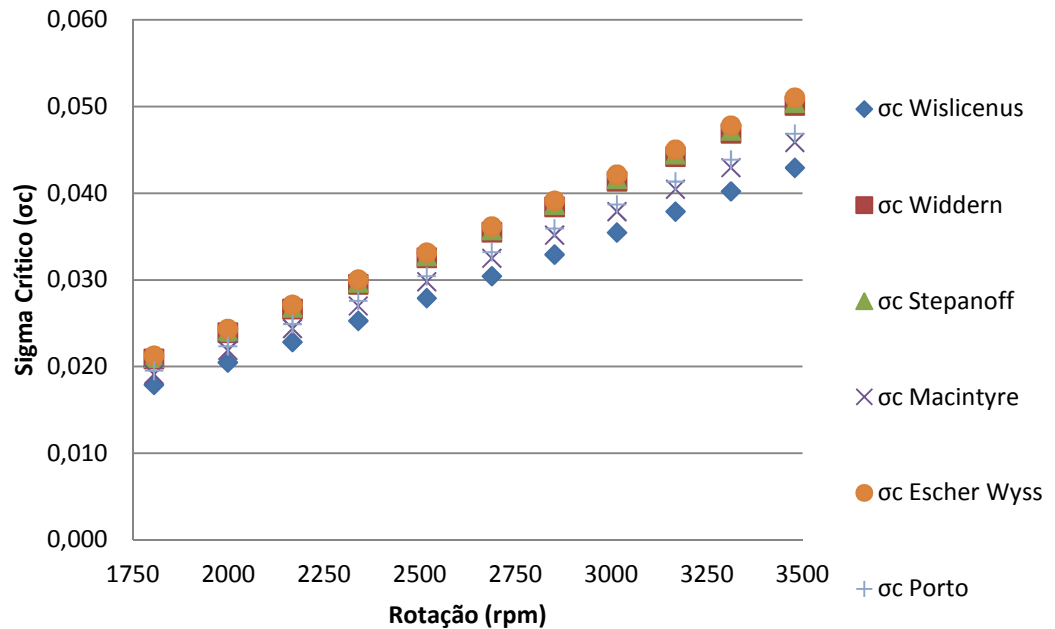


Figura 36 – Gráfico sobre o comportamento dos sigmas críticos com a variação da rotação
Fonte: Autor (2015).

Observa-se que os sigmas críticos analisados pouco se diferiram entre si, apresentando diferenças apenas na terceira casa decimal.

Então, elaborou-se um novo teste, desta vez analisando-se o comportamento dos σ_c 's em função da vazão. Várias bombas de diferentes marcas foram selecionadas com as mais diversas vazões, porém mantendo-se fixas a altura manométrica em 25 mca e a rotação plena de 3480 rpm. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação entre sigmas críticos para diferentes vazões.

Vazão (m³/h)	Velocidade Específica (Nq)	σ Escher Wyss	σ Macintyre	σ Porto	σ Stepanoff	σ Widdern	σ Wislicenus
8,00	14,67	0,0440	0,0395	0,0404	0,0435	0,0432	0,0370
10,00	16,40	0,0510	0,0459	0,0469	0,0504	0,0501	0,0429
15,00	20,09	0,0669	0,0601	0,0614	0,0661	0,0657	0,0563
20,00	23,20	0,0810	0,0728	0,0744	0,0801	0,0795	0,0682
25,00	25,94	0,0940	0,0845	0,0863	0,0929	0,0923	0,0791
40,00	32,81	0,1286	0,1155	0,1181	0,1271	0,1263	0,1082
50,00	36,68	0,1492	0,1341	0,1370	0,1475	0,1465	0,1255

Fonte: Autor (2015).

Com os dados obtidos na Tabela 10, construiu-se o gráfico apresentado na Figura 37.

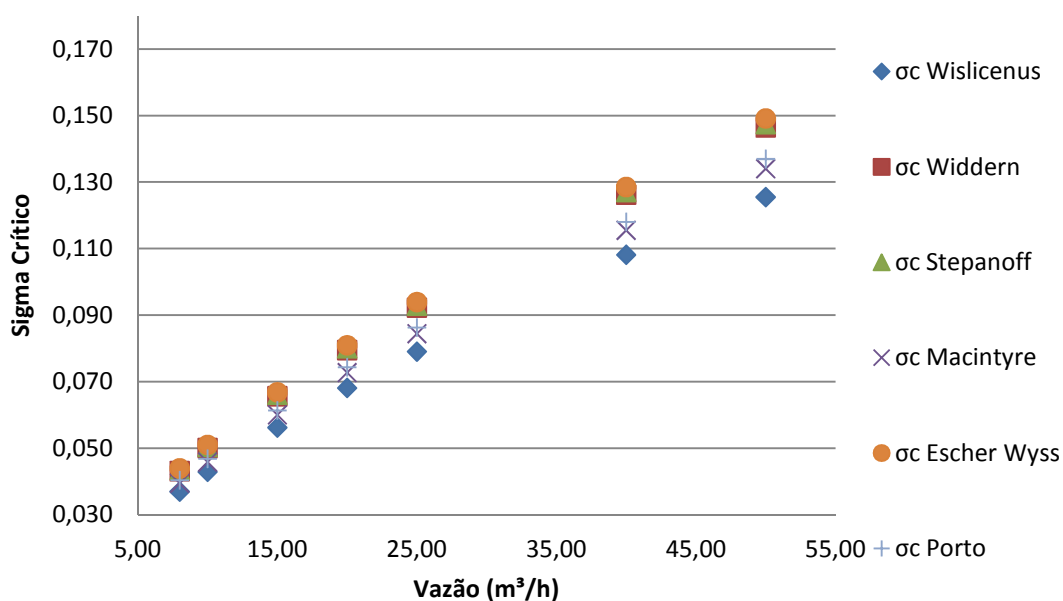


Figura 37 – Gráfico de comparação entre os sigmas críticos com a vazão variável.
Fonte: Autor (2015).

O comportamento para esta análise foi semelhante ao apresentado na Figura 36. As equações propostas por Porto e Macintyre ocuparam regiões intermediárias as demais equações. Observa-se que o parâmetro sigma crítico não apresenta aumento expressivo, com relação à elevação da vazão do sistema. A Figura 38 apresenta o gráfico obtido adicionando-se um cálculo de média dos parâmetros.

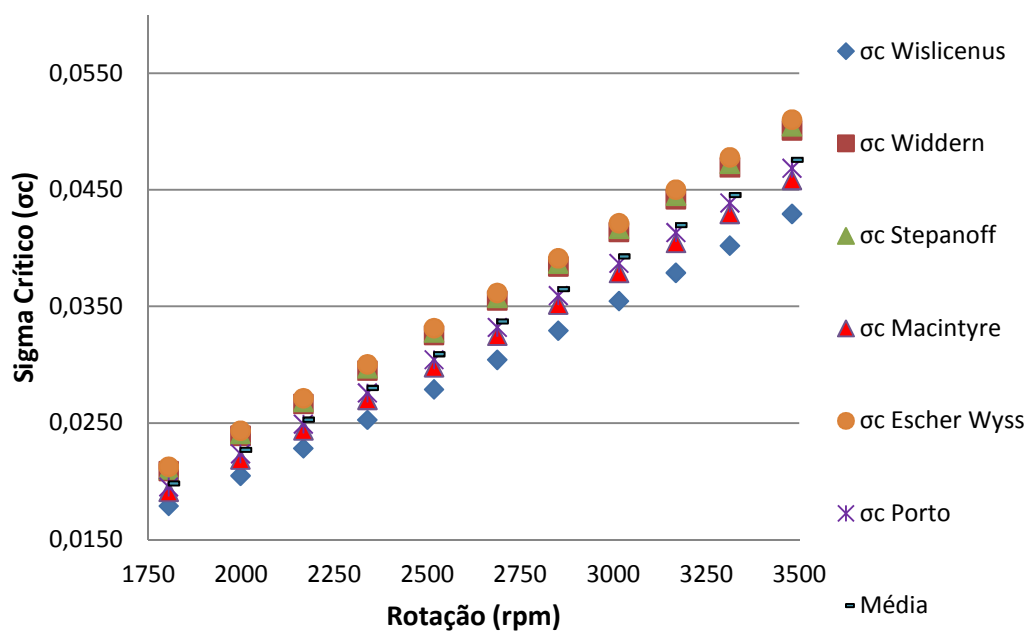


Figura 38 - Gráficos de sigmas críticos e média dos sigmas.
 Fonte: Autor (2015).

Diante das Figuras 36, 37 e 38, observa-se que a equação apresentada pelos critérios de Macintyre (1982) e Porto (2006) estão juntamente a linha média dos critérios apresentados. Então, testaram-se essas duas equações com os dados obtidos nos ensaios. Na comparação entre as equações, foi observada diferenças somente na terceira casa decimal. Portanto, adotou-se a equação de Porto (2006) para a verificação entre σ 's. Devido à maior proximidade com a linha média dos sigmas e, também, por sua publicação ser mais atual em comparação a Macintyre (1982).

Portanto, diante da definição dos critérios iniciaram-se as análises por configurações. A Tabela 11 apresenta as equações e os critérios adotados.

Tabela 11 - Equações e critérios adotados.

Parâmetro	Fonte	Equação	Crítérios de cavitação
$NPSH_d$	Adaptação Autor (2015)	$NPSH_d = p_a + p_{sucção} + \frac{v^2}{2g}$	$NPSH_d < NPSH_r$
$NPSH_r$	YEDIDIAH (1996)	$NPSH_r = 0,67 \times Q_n^{0,464}$	
Número de Thoma (σ)	PORTO (2006)	$\sigma = \frac{NPSH_d}{H}$	$\sigma_c > \sigma$
Sigma crítico (σ_c)	PORTO (2006)	$\sigma_c = 0,0002 \times N_s^{4/3}$	

Fonte: Autor, (2015).

5.3 Análise para as Configurações 3 e 4

Os ensaios foram realizados nos dias 02/07/15 e 03/07/15, para a configuração 3 e nos dias 07/07/2015 e 09/07/2015 para a configuração 4. Os dados obtidos foram trabalhados seguindo a metodologia aplicada as configurações 1 e 2. Entretanto, não foram observados pontos com ocorrência de cavitação, mesmo com a indução do sistema ao fenômeno.

Os modelos de bombas utilizados nessas configurações é o INI 32-125, vazão nominal de 14 m³/h e altura manométrica de 6 mca. Conforme observado nas configurações anteriores, para que ocorra a cavitação, a energia de sucção deve alcançar valores inferiores a -8,0 mca de pressão relativa. Por tratar-se de modelos pequenos de bombas, não foi possível alcançar tal pressão em sua sucção. Portanto, esses dados não serão apresentados neste trabalho.

5.4 Análise para a Configuração 1

Em decorrência da aplicação dos cálculos anteriormente apresentados, obteve-se a Tabela 12 que apresenta os valores médios para cada percentual de frequência de rotação do motor operando em ambas as condições, ou seja, “normal” e com “indução de cavitação”. A avaliação do desvio padrão foi aplicada a dois parâmetros:

a vazão e altura manométrica. Entretanto, a altura manométrica apresentou maior variação, devido ao uso de conjuntos simples e em série. Portanto, o desvio padrão utilizado foi o intervalo da altura manométrica, as médias para os demais parâmetros foram calculadas com os dados correspondentes a este intervalo.

Observa-se que os valores apresentados na coluna $NPSH_d$ “normal” mantiveram-se para todas as faixas de estudo, acima dos valores obtidos para o $NPSH_r$ “normal”, confirmando a não ocorrência de cavitação, bem como a comparação entre σ 's, ao qual a coluna do número de Thoma (σ) manteve-se para todas as faixas acima da coluna de sigma crítico (σ_c). É interessante salientar que o parâmetro σ_c manteve-se praticamente constante para as diferentes faixas de frequência, enquanto que o parâmetro σ aumentou gradativamente ao passo que a velocidade de rotação foi reduzida, afirmando a hipótese de menor tendência a cavitação em operações com baixas rotações, visto que quanto mais próximo de zero o σ , maior é a intensidade de cavitação.

Tabela 12 – Dados médios obtidos para a configuração 1 em condição normal de operação

Situação Normal									
Frequência (%)	N° de dados	Média Vazão (m ³ /h)	Desvio padrão (Q) ($\pm 2S$)	Média Altura Man. (H) (mca)	Desvio padrão (H) ($\pm 2S$)	$NPSH_d$ Média (mca)	$NPSH_r$ Yedidiah Média (mca)	Número de Thoma Média (σ)	Sigma Crítico Porto (σ_c)
100	192	10,41	0,22	52,39	1,42	9,53	1,81	0,182	0,023
95	117	9,85	0,33	49,98	0,47	9,54	1,77	0,191	0,022
90	138	10,39	0,27	44,80	0,51	9,54	1,81	0,213	0,024
85	93	9,80	0,08	42,65	0,27	9,54	1,76	0,224	0,022
80	139	10,24	0,13	38,17	0,28	9,49	1,80	0,249	0,023
75	131	9,63	0,06	36,00	0,17	9,49	1,75	0,264	0,022
70	84	10,46	0,16	29,67	0,23	9,54	1,81	0,322	0,026
65	107	9,93	0,08	28,56	0,21	9,54	1,77	0,334	0,024
60	104	10,09	0,28	24,97	0,86	9,55	1,78	0,383	0,025
55	120	9,03	0,59	24,88	0,20	9,54	1,70	0,383	0,021
50	120	9,08	0,21	22,69	0,15	9,55	1,71	0,421	0,020

Fonte: Autor, (2014).

Observa-se que o parâmetro $NPSH_r$ apresentou em média valores em torno de apenas 18,5% do valor de $NPSH_d$. A Tabela 13 apresenta os resultados médios para os principais parâmetros em condição de “indução de cavitação”.

Tabela 13 – Dados médios obtidos para a configuração 1 em condição de operação com indução de cavitação.

Situação de Cavitação										
Freq. (%)	N° de dados (NPSH)	Média Vazão (m³/h)	Desvio padrão (Q) ($\pm 2S$)	Média Altura Man. (H) (mca)	Desvio padrão (H) ($\pm 2S$)	$NPSH_d$ Média (mca)	$NPSH_r$ Yedidiah Média (mca)	N° de dados (σ 's)	N° de Thoma Média (σ)	Sigma Crítico Porto (σ_c)
100	31	5,40	4,67	24,99	14,06	0,90	1,34	10	0,030	0,034
95	25	7,64	3,21	21,57	11,23	0,95	1,58	15	0,037	0,042
90	21	5,51	4,05	23,24	11,69	1,06	1,36	0	0,000	0,030
85	16	7,93	2,93	20,90	9,43	1,07	1,61	2	0,031	0,037
80	29	7,25	3,98	16,28	7,73	0,92	1,54	4	0,040	0,047
75	25	6,32	3,22	15,45	5,29	1,04	1,45	1	0,043	0,044
70	9	7,63	2,16	15,72	2,74	1,20	1,57	0	0,000	0,040
65	5	6,26	6,38	17,57	4,70	1,13	1,42	0	0,000	0,027
60	11	9,80	0,78	14,47	0,83	1,15	1,76	0	0,000	0,042
55	4	6,95	0,76	14,34	0,77	1,20	1,52	0	0,000	0,031
50	4	6,95	0,76	14,34	0,77	1,20	1,52	0	0,000	0,027

Fonte: Autor, (2014).

Analisando os mesmos parâmetros em situação de “cavitação”, observa-se que a média dos valores de $NPSH_d$ ficaram abaixo dos valores obtidos para o $NPSH_r$, indicando a ocorrência de cavitação. Devido à indução de perda de carga do sistema nesta situação, por meio do fechamento do registro na entrada da sucção houve uma grande variação nas médias de vazão, dificultando assim sua correlação com os parâmetros de NPSH. Quanto à análise por meio do critério de σ 's, estes apresentaram número de dados com ocorrência do fenômeno, bem inferiores ao critério de $NPSH$'s. Em algumas faixas de frequência, não apresentaram dados com ocorrência de cavitação, segundo seu critério, representado por 0 na Tabela 13. Entretanto, nas faixas as quais apresentaram ocorrência do fenômeno, observa-se uma leve tendência ao afastamento do zero absoluto, à medida que a velocidade de rotação é reduzida, comportamento semelhante à condição analisada anteriormente. A Figura 39 apresenta as curvas de $NPSH_r$ e $NPSH_d$ para a situação “normal”.

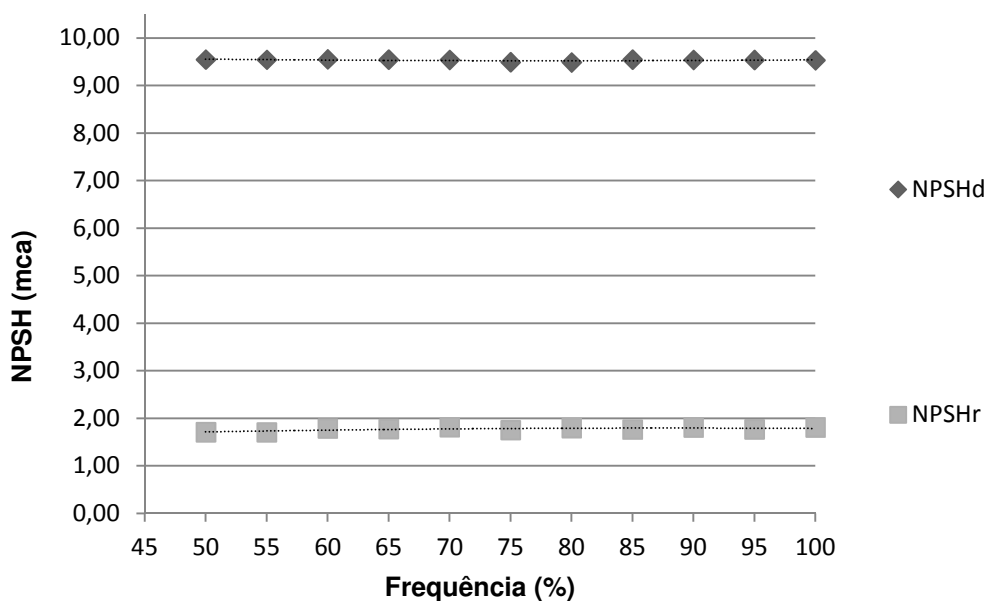


Figura 39 – Gráfico NPSH_d x NPSH_r com a variação da frequência, em condição normal de operação para a configuração 1.
 Fonte: Autor, (2014).

Observam-se duas retas horizontais paralelas. Isto se deve ao fato, que estes parâmetros são função da vazão, a qual para esta análise foi mantida em todas as faixas de frequência próximas a vazão nominal. A Figura 40 apresenta o gráfico equivalente para a situação de cavitação.

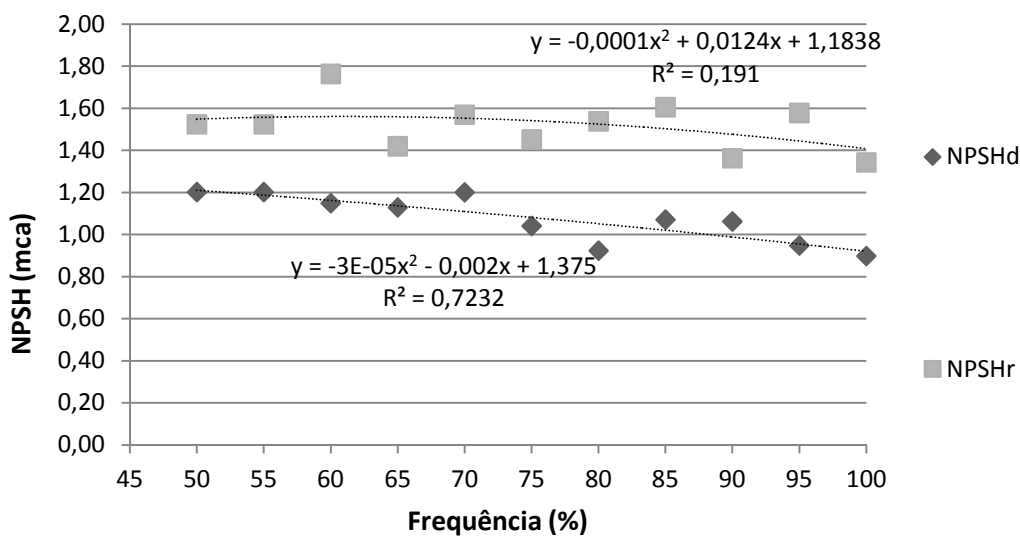


Figura 40 – Gráfico NPSH_d x NPSH_r com a variação da frequência, em condição de cavitação para a configuração 1.
 Fonte: Autor, (2014).

As curvas apresentadas na Figura 40 apresentaram um comportamento com maior dispersão, porém evidencia-se o distanciamento entre as curvas, em que a curva de $NPSH_d$ desenvolveu-se sempre abaixo da curva de $NPSH_r$ indicando a ocorrência da cavitação.

A Figura 41 apresenta o gráfico construído a partir dos resultados obtidos na Tabela 13 para os σ 's. Observa-se que o número de Thoma manteve-se abaixo de sigma crítico, nas faixas em que houve dados com ocorrência de cavitação. Os valores médios apresentados foram construídos com base nos critérios de σ 's (equação 13) e de $NPSH$'s (equação 23). O critério de $NPSH$'s apresentou maior número de dados correspondentes ao fenômeno de cavitação em relação ao critério de σ 's, como pode ser observado na Tabela 13. Portanto, pode-se verificar que o critério de $NPSH$'s é mais conservador com relação à proteção do sistema da ocorrência de cavitação.

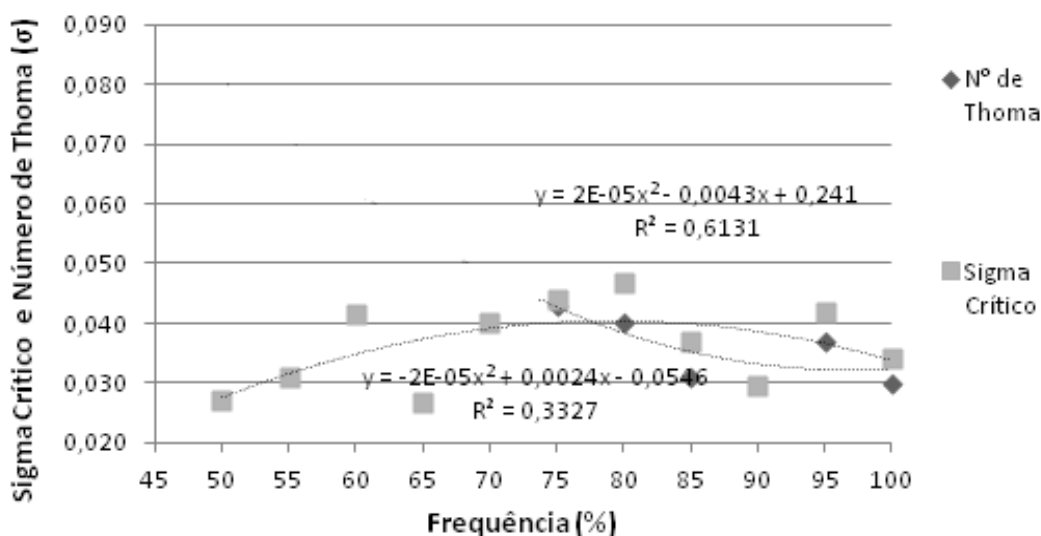


Figura 41 – Gráfico sobre o comportamento do número de Thoma e sigma crítico com a variação da rotação em situação de indução de cavitação para a configuração 1. Fonte: Autor, (2014).

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos com os cálculos de potências hidráulicas e rendimento para a configuração 1 para as situações “normal” e de “indução de cavitação”, bem como, o rendimento equivalente calculado pela equação 24.

Tabela 14 – Rendimentos, Potências Elétricas e Hídricas para ambas as condições da configuração 1

Freq. (%)	Rend. Fornec. (%)	N° de dados	Situação Normal			Situação Cavitação			$\Delta\eta$	
			Potência Elétrica Média (W)	Potência Hidraul. Média (W)	Rend. Normal (η)	N° de dados	Potência Elétrica Média (W)	Potência Hidraul. Média (W)		Rend. Cavitação (η)
100	53,0%	192	3509,8	1493,4	42,5%	31	1941,8	366,8	18,9%	23,7%
95	48,0%	117	2949,4	1339,8	45,4%	25	1812,4	448,1	24,7%	20,7%
90	48,5%	138	2687,5	1266,4	47,1%	21	1805,4	348,1	19,3%	27,8%
85	48,0%	93	2332,0	1136,8	48,7%	16	1405,3	450,8	32,1%	16,7%
80	47,4%	139	2244,1	1062,4	47,3%	29	1439,5	321,1	22,3%	25,0%
75	47,1%	131	2055,1	942,4	45,9%	25	1364,6	265,7	19,5%	26,4%
70	46,5%	84	1854,3	844,9	45,6%	9	1364,6	326,4	23,9%	21,6%
65	45,7%	107	1588,3	771,6	48,6%	5	1247,3	299,2	24,0%	24,6%
60	45,5%	104	1444,5	690,7	47,8%	11	1004,0	385,8	38,4%	9,4%
55	45,1%	120	1191,0	611,8	51,4%	4	866,0	271,0	31,3%	20,1%
50	43,3%	120	1039,6	560,7	53,9%	4	778,0	271,0	34,8%	19,1%

Fonte: Autor, (2015).

Observa-se que até a faixa de 70% da frequência de rotação, a situação “normal” apresenta um rendimento inferior em comparação à coluna do valor equivalente recomendado pelo fabricante. A menor eficiência do conjunto pode ser influenciada por inúmeros fatores, tais como a necessidade de manutenção entre outros. Para rotações abaixo da referida frequência, houve um rendimento superior ao equivalente estimado com dados do fornecedor, acredita-se que devido à imposição de trabalho próxima a vazão nominal (10 m³/h) tenha causado este aumento no rendimento.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 14, verifica-se que em comparação com sua respectiva faixa de operação, há uma redução significativa do rendimento quando operando em situação de “indução de cavitação”. A Figura 42 apresenta o gráfico com as curvas de rendimento para ambas as situações.

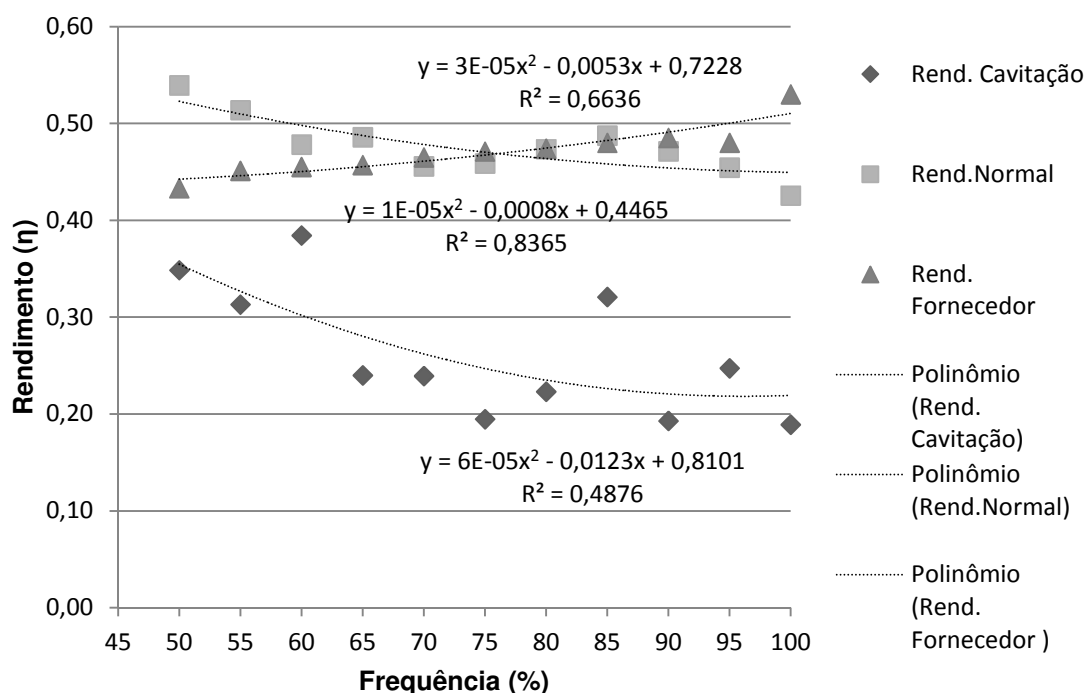


Figura 42 – Gráfico dos Rendimentos em ambas as situações com a variação da frequência de rotação para a configuração 1.
Fonte: Autor,(2014).

O gráfico apresenta um acentuado decréscimo do rendimento ocorrido em determinadas faixas de operação. O rendimento chegou a atingir 27,8% correspondente à faixa de 90%, porém em média a queda no rendimento geral, em comparação ao rendimento “normal” foi de 21,4%, valor significativo em sistemas elevatórios.

Na sequência, calcularam-se os indicadores energéticos para ambas as situações. O primeiro indicador calculado foi o consumo específico Com o intuito de trazer as mesmas, a uma base de comparação, quanto de energia foi consumido para cada metro cúbico de água recalçado. A Tabela 15 apresenta os resultados para o CE, juntamente ao impacto causado pela cavitação sobre o CE “normal”.

Tabela 15 - Resultados obtidos para o consumo específico de energia elétrica (CE) em situação "normal" e de "cavitação" para a configuração 1.

Consumo Específico de Energia Elétrica (CE)					
Freq. (%)	Média Vazão Normal (m ³ /h)	CE Normal (kWh/m ³)	Média Vazão Cavitação (m ³ /h)	CE Cavitação (kWh/m ³)	Impacto da Cavitação sobre o consumo "normal"
100	10,40	0,34	5,40	0,36	6,6%
95	9,85	0,30	7,64	0,24	-20,7%
90	10,39	0,26	5,51	0,33	26,8%
85	9,80	0,24	7,93	0,18	-25,5%
80	10,24	0,22	7,25	0,20	-9,4%
75	9,63	0,21	6,32	0,22	1,2%
70	10,46	0,18	7,63	0,18	0,9%
65	9,93	0,16	6,26	0,20	24,6%
60	10,09	0,14	9,80	0,10	-28,5%
55	9,03	0,13	6,95	0,12	-5,5%
50	9,08	0,11	6,95	0,11	-2,2%

Fonte: Autor, (2015).

Em relação ao CE "normal", verifica-se que à medida que a frequência de rotação foi reduzida, houve menor consumo de energia por metro cúbico bombeado segundo os resultados obtidos pelo indicador. Isso se deve a menor exigência motora do conjunto. Em consequência, houve menor consumo de energia por metro cúbico de água recalado, porém a faixa que apresentou a melhor eficiência foi a de 65% de frequência de rotação, a qual apresentou rendimento de 48,6% e o valor médio de CE de 0,16 kWh/m³. O comportamento do CE "cavitação", não apresentou uma tendência linear, devido à indução à cavitação ser realizada por meio do fechamento gradual do registro na sucção. Assim, os resultados médios das vazões em "cavitação" apresentaram dispersão. Dessa forma, decidiu-se aplicar o desvio padrão à média da vazão de "cavitação".

Primeiramente, calculou-se o desvio padrão (S) e aplicou-se $\pm 2S$ sobre a média das vazões. No entanto, como a amostra contém apenas 11 pontos, referentes às velocidades de rotação, somente 1 ponto *outlier* seria excluído. Então, optou-se por aplicar $\pm S$ ($\pm 1,24$ m³/h) sobre a média (7,06 m³/h), obtendo-se assim maior exclusão de pontos *outliers*. Os pontos *outliers* foram representados na cor vermelha na Tabela 15. A Figura 43 apresenta os resultados obtidos com o cálculo dos limites inferior e superior da vazão de cavitação.

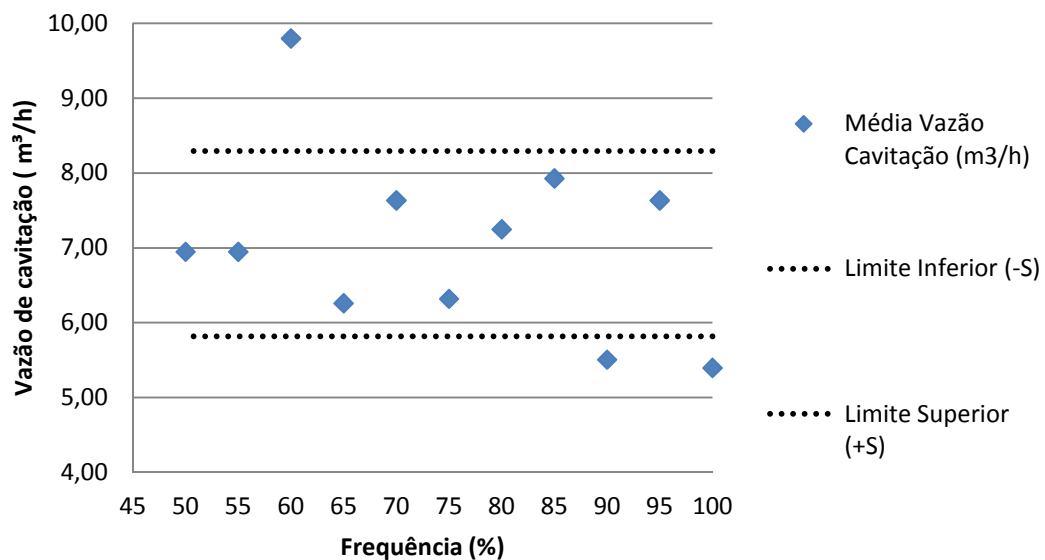


Figura 43 - Limites inferior e superior da vazão de cavitação.
 Fonte: Autor, (2015).

A partir dos dados apresentados na Tabela 15, calcularam-se os valores médios para CE normal e CE cavitação, excluindo-se os valores *outliers*. Para o CE normal, os ensaios apresentaram um CE médio de 0,19 kWh/m³. Com relação ao CE cavitação, a média representou 0,18 kWh/m³. No entanto, os valores obtidos para o CE, não apresentaram diferença significativa neste tipo de configuração.

Diante dos resultados obtidos com relação ao CE, optou-se pela aplicação de outro indicador, o consumo de energia normalizado (CEN). Este indicador refere-se ao consumo energético para que 1 m³ de líquido seja bombeado a 100 m de altura. A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos para o indicador CEN calculado para ambas as condições (normal e de cavitação).

O indicador CEN para a condição normal apresentou tendência à redução do consumo, à medida que a velocidade de rotação foi diminuída. Com relação à situação de indução de cavitação, o CEN apresentou dispersão dos resultados. Então, aplicou-se o desvio padrão ($\pm S$, $\pm 3,89$ m³/h) à média das alturas manométrica (18,08 m³/h). As faixas apresentadas em vermelho representam os pontos *outliers*.

Tabela 16 - Resultados obtidos para o indicador CEN aplicado a configuração 1 em situação normal e de cavitação.

Consumo de Energia Normalizado (CEN)							
Freq. (%)	Média Vazão Normal (m ³ /h)	Média Altura Man. (H) (mca)	CEN Normal (kWh/(m ³ /100m))	Média Vazão Cavitação (m ³ /h)	Média Altura Man. (H) (mca)	CEN Cavitação (kWh/(m ³ /100m))	Impacto da Cavitação sobre o consumo "normal"
100	10,40	52,39	0,64	5,40	24,99	1,44	123,5%
95	9,85	49,98	0,60	7,64	21,57	1,10	83,7%
90	10,39	44,80	0,58	5,51	23,24	1,41	144,4%
85	9,80	42,65	0,56	7,93	20,90	0,85	52,0%
80	10,24	38,17	0,57	7,25	16,28	1,22	112,4%
75	9,63	36,00	0,59	6,32	15,45	1,40	135,6%
70	10,46	29,67	0,60	7,63	15,72	1,14	90,4%
65	9,93	28,56	0,56	6,26	17,57	1,13	102,5%
60	10,09	24,97	0,57	9,80	14,47	0,71	23,4%
55	9,03	24,88	0,53	6,95	14,34	0,87	64,0%
50	9,08	22,69	0,50	6,95	14,34	0,78	54,8%

Fonte: Autor, (2015)

Dessa forma, o CEN em situação de cavitação apresentou tendência à redução do índice, quando em operação com menores velocidades de rotação. Os valores médios de CEN excluindo os pontos *outliers*, foram respectivamente para situação normal 0,57 kWh/m³/100m, e em situação de cavitação 1,02 kWh/m³/100m. A indução de cavitação ao sistema apresentou um impacto sobre o consumo "normal" de 79,9%, ou seja, houve um aumento no consumo de energia de 79,9%. A Figura 44 apresenta a comparação entre os indicadores CEN em situação de indução à cavitação e em situação de operação normal.

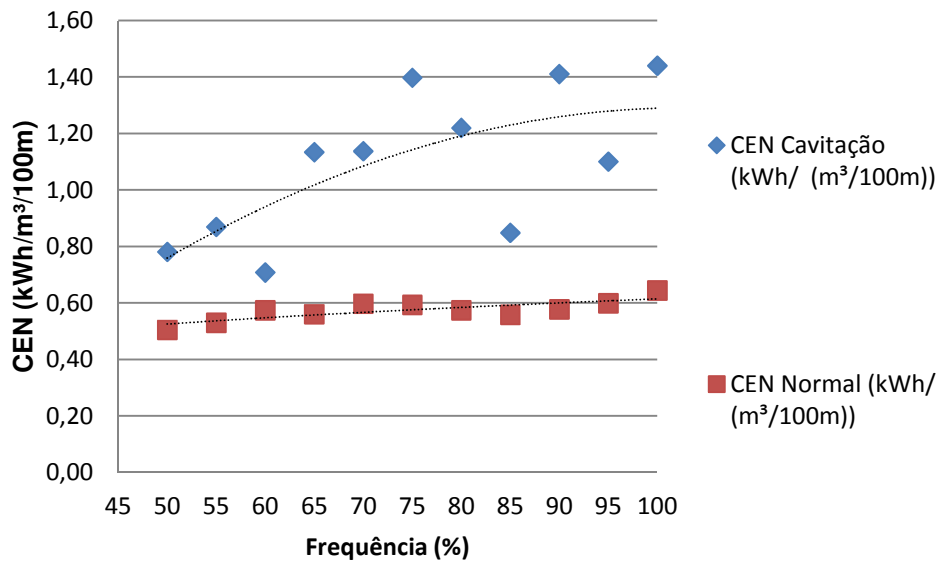


Figura 44 - Comparação entre os indicadores CEN em situação normal e de cavitação.
 Fonte: Autor, (2015).

O distanciamento entre os pontos evidencia o maior consumo energético quando em operação com indução a cavitação.

5.5 Análise para a Configuração 2

Na sequência os ensaios foram realizados para a configuração 2. Aplicando a metodologia anteriormente apresentada, obtiveram-se os seguintes resultados conforme a Tabela 17 para situação “normal”.

Observa-se que devido à tentativa de manter-se a vazão nominal para as diferentes velocidades de rotação, houve significativa queda da altura manométrica dos conjuntos, porém com relação aos NPSH's a variação foi pouco significativa.

Tabela 17 – Dados médios obtidos para a configuração 2 em condição normal de operação.

Situação Normal									
Freq. (%)	N° de dados	Média Vazão (m ³ /h)	Desvio padrão (Q) (± 2S)	Média Altura Man. (H) (mca)	Desvio padrão (H) (± 2S)	NPSH _d Média (mca)	NPSH _r Yedidiah Médio (mca)	N° de Thoma Média (σ)	Sigma Crítico Médio Porto (σ _c)
100	116	10,56	0,23	82,76	1,13	9,52	1,82	0,115	0,015
95	121	9,86	0,15	77,72	0,65	9,52	1,77	0,122	0,014
90	132	9,33	0,07	72,60	0,37	9,52	1,73	0,131	0,014
85	97	10,31	0,41	64,13	0,94	9,51	1,80	0,148	0,015
80	116	9,81	0,21	59,12	0,60	9,51	1,76	0,161	0,015
75	107	9,16	0,08	54,66	0,33	9,52	1,71	0,174	0,014
70	130	9,64	1,50	47,84	3,51	9,50	1,75	0,199	0,016
65	98	9,81	0,72	44,16	5,01	9,59	1,76	0,218	0,016
60	127	10,21	0,38	35,99	1,53	9,62	1,79	0,267	0,018
55	123	9,56	0,06	33,13	0,30	9,62	1,74	0,290	0,016
50	88	9,36	0,74	26,27	0,26	9,82	1,73	0,372	0,018

Fonte: Autor,(2014)

Os valores obtidos para NPSH_d encontram-se acima dos valores de NPSH_r o que confirma a não ocorrência de cavitação. Os valores para sigma crítico mantiveram-se praticamente constantes, bem como o número de Thoma continuou a apresentar a tendência a distanciar-se do número zero, a medida que foi imposto aos conjuntos menores velocidades de rotação. A Figura 45 apresenta o gráfico de correlação entre os parâmetros de NPSH para diferentes frequências em situação “normal”.

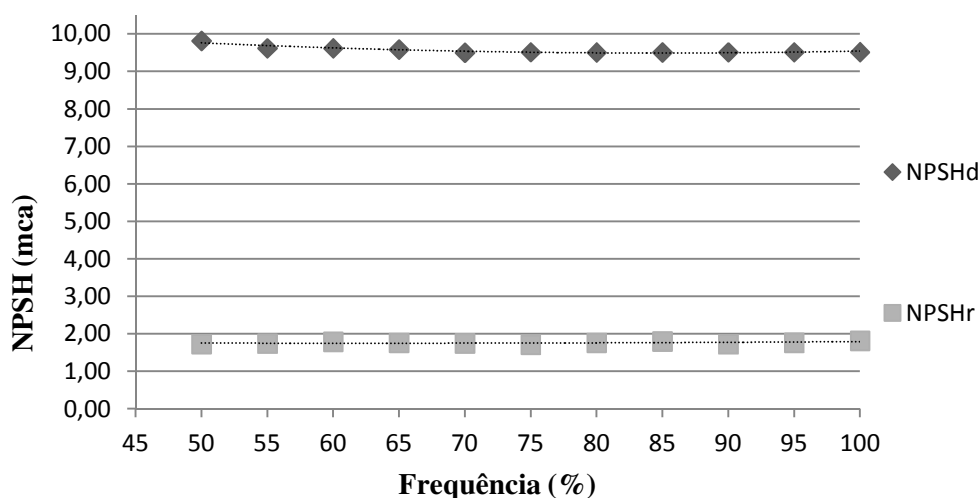


Figura 45 – Gráfico NPSH_d x NPSH_r em condição normal de operação para a configuração 2.

Fonte: Autor,(2014).

Observa-se no gráfico, que pouco se diferiu do gráfico apresentado na Figura 39. Devido às condições de operação ser semelhantes, ou seja, estes parâmetros são função da vazão de operação que para esta análise foi mantida em todas as faixas de frequência próximas a vazão nominal, ou seja, a mesma condição deste parâmetro na operação da configuração 1. A Tabela 18 apresenta os dados médios obtidos para a situação de “indução à cavitação”.

Tabela 18 – Dados médios obtidos para a Configuração 2 em condição de operação com indução à cavitação .

Situação de Cavitação										
Freq. (%)	N° de dados (NPSH)	Média Vazão (m ³ /h)	Desvio padrão (Q) (± 2S)	Média Altura Man. (H) (mca)	Desvio padrão (H) (± 2S)	NPSHd Média (mca)	NPSHr Yedidi ah Médio (mca)	N° de dados (σ's)	N° de Thoma Média (σ)	Sigma Crítico Médio Porto (σc)
100	46	5,94	5,23	26,12	20,48	0,98	1,39	16	0,028	0,032
95	43	5,76	4,76	26,14	23,16	0,97	1,38	8	0,025	0,028
90	35	5,73	4,10	26,09	18,57	0,99	1,38	4	0,027	0,027
85	36	5,90	4,71	23,23	17,07	1,00	1,40	2	0,020	0,021
80	34	6,30	4,25	23,75	15,19	1,08	1,44	0	0	0,028
75	30	6,01	3,71	23,79	14,66	1,05	1,42	0	0	0,025
70	31	6,44	3,91	23,52	12,78	1,08	1,46	0	0	0,024
65	45	4,83	4,73	16,75	6,90	0,92	1,27	0	0	0,024
60	43	5,57	5,12	16,94	6,93	0,97	1,35	0	0	0,024
55	34	5,25	4,09	16,28	4,38	1,02	1,33	0	0	0,022
50	40	5,15	4,90	14,68	1,92	0,95	1,31	0	0	0,021

Fonte: Autor,(2014).

Observa-se que a média dos valores de NPSH_d ficaram abaixo dos valores obtidos para o NPSH_r, indicando a ocorrência de cavitação. Neste caso, a vazão manteve certa uniformidade, mesmo com a indução de perda de carga ao sistema. Os σ's demonstraram comportamento semelhante à configuração 1. A Figura 46 apresenta o gráfico NPSH_d x NPSH_r com a variação da frequência, em situação de “cavitação”.

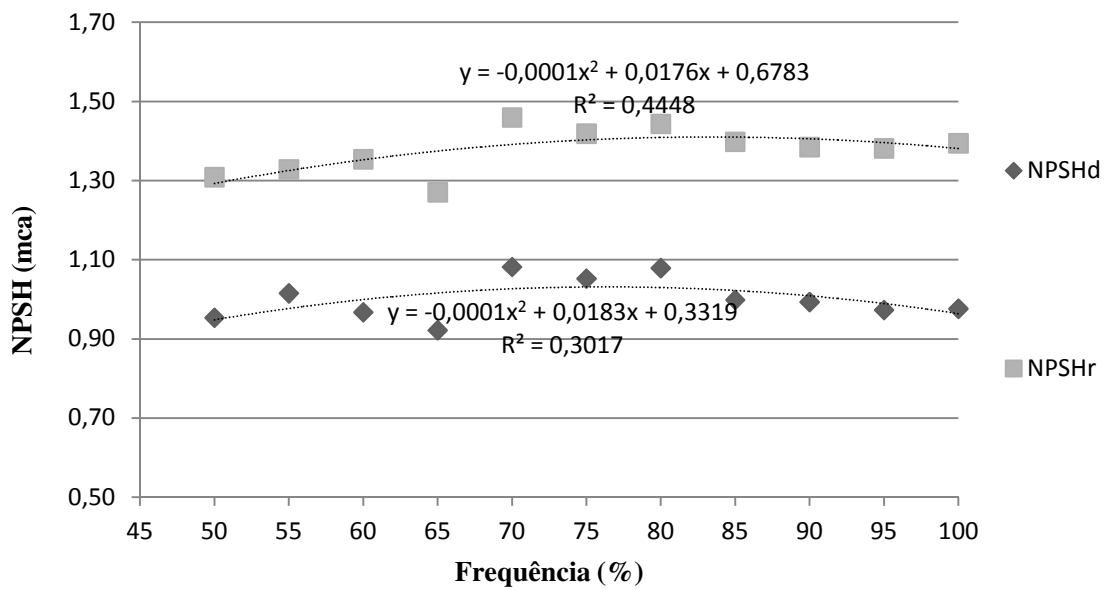


Figura 46 – Gráfico NPSHd x NPSHr com a variação da frequência, em condição de cavitação para a configuração 2.
 Fonte: Autor, (2014).

Observa-se que a tendência do $NPSH_r$ é diminuir com a redução da rotação. Este fato é verificado nos gráficos das Figuras 31, 32 e 33. Quanto ao parâmetro $NPSH_d$, este manteve-se abaixo do $NPSH_r$, caracterizando, assim a ocorrência de cavitação.

Diante das médias dos parâmetros foram estimadas as potências hidráulicas. Para tanto, selecionaram-se as potências elétricas medidas e, então estimaram-se os rendimentos. A Tabela 19 apresenta os resultados para as potências e rendimentos em ambas as situações de operação das bombas associadas na configuração 2.

Tabela 19 – Rendimentos, potências elétricas e hidráulicas de ambas as condições da configuração 2

Situação Normal					Situação Cavitação				
Freq. (%)	N° de dados	Potência Elétrica Média (W)	Potência Hidráulica Média (W)	Rend. (η)	N° de dados	Potência Elétrica Média (W)	Potência Hidráulica Média (W)	Rend. (η)	$\Delta\eta$
100	116	6894,3	2376,7	34,5%	46	2938,0	422,1	14,4%	20,1%
95	121	5685,0	2084,8	36,7%	43	2534,6	409,5	16,2%	20,5%
90	132	4839,5	1843,5	38,1%	35	2284,8	406,8	17,8%	20,3%
85	97	4450,0	1799,2	40,4%	36	2177,9	373,0	17,1%	23,3%
80	116	3921,8	1577,7	40,2%	34	2150,6	407,1	18,9%	21,3%
75	107	3583,6	1361,9	38,0%	30	2190,8	389,1	17,8%	20,2%
70	130	3283,6	1254,3	38,2%	31	1970,2	412,2	20,9%	17,3%
65	98	2972,4	1178,9	39,7%	45	1748,6	220,1	12,6%	27,1%
60	127	2551,1	999,4	39,2%	43	1615,7	256,9	15,9%	23,3%
55	123	2176,6	861,5	39,6%	34	1528,2	232,4	15,2%	24,4%
50	88	1891,9	669,0	35,4%	40	1347,5	205,5	15,3%	20,1%

Fonte: Autor,(2015).

Por meio dos dados apresentados nesta Tabela, pode-se observar a redução do rendimento para a mesma faixa de frequência comparando-se as situações. Em termos gerais, houve redução no rendimento do conjunto para todas as faixas de velocidade, comparando a situação de “cavitação” com a situação “normal”. A maior redução ocorreu na faixa de frequência correspondente a 65% da velocidade de rotação, resultou em uma queda no rendimento de 27,1%. Com os resultados apresentados na Tabela 19, construiu-se o gráfico apresentado na Figura 47, relacionando o rendimento do conjunto motobomba na situação “normal” e na ocorrência da cavitação.

Observa-se de modo geral, uma significativa queda no rendimento do conjunto motobomba na presença de cavitação, representando um decréscimo médio no parâmetro rendimento de 21,6% em relação ao rendimento “normal”.

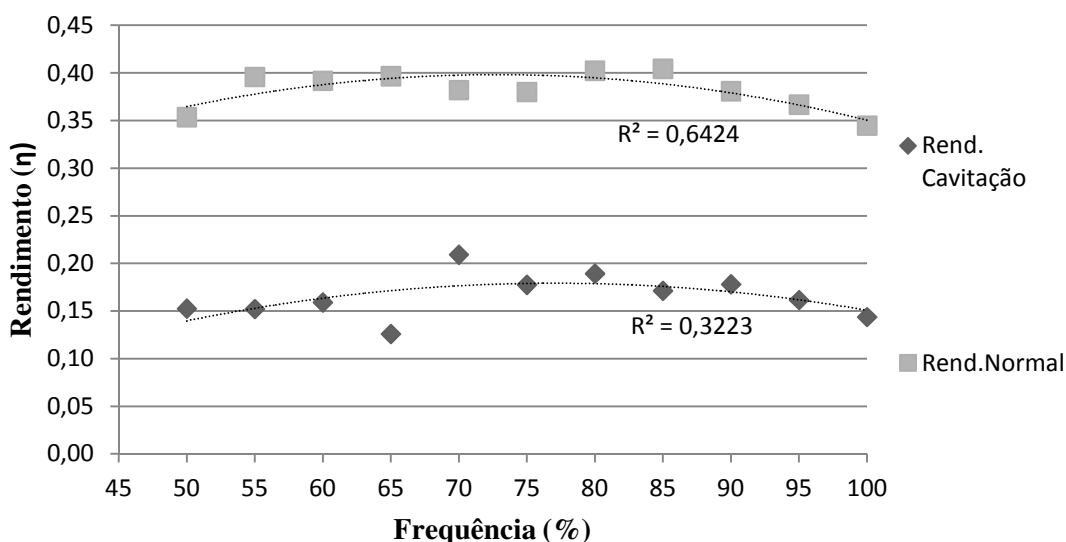


Figura 47 – Comportamento dos rendimentos com a variação da frequência de rotação para a configuração 2.
 Fonte: Autor,(2014).

Na sequência, calcularam-se os consumos específicos (CE) para ambas as situações, obtendo-se quanto de energia foi necessário para cada metro cúbico de água bombeado. A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos para o CE, juntamente com o impacto causado pela cavitação sobre o CE “normal”.

Tabela 20 - Resultados para o CE em situação "normal" e de "cavitação" para a configuração 2.

Consumo Específico de Energia Elétrica (CE)					
Freq. (%)	Média Vazão Normal (m ³ /h)	CE Normal (kWh/m ³)	Média Vazão Cavitação (m ³ /h)	CE Cavitação (kWh/m ³)	Impacto da Cavitação sobre o consumo "normal"
100	10,56	0,7	5,94	0,5	-24,3%
95	9,86	0,6	5,76	0,4	-23,6%
90	9,33	0,5	5,73	0,4	-23,1%
85	10,31	0,4	5,90	0,4	-14,5%
80	9,81	0,4	6,30	0,3	-14,6%
75	9,16	0,4	6,01	0,4	-6,9%
70	9,64	0,3	6,44	0,3	-10,2%
65	9,81	0,3	4,83	0,4	19,5%
60	10,21	0,2	5,57	0,3	16,0%
55	9,56	0,2	5,25	0,3	27,8%
50	9,36	0,2	5,15	0,3	29,5%

Fonte: Autor, (2015).

Em relação ao CE “normal”, verifica-se que à medida que a frequência de rotação foi reduzida, houve redução no resultado obtido pelo indicador, assim como na configuração 1. Entretanto, obteve-se valores maiores para o CE normal da configuração 2, em relação a configuração 1, apresentando a melhor eficiência de operação para a faixa de frequência 85%, obteve-se rendimento de 40,4%. O comportamento do CE “cavitação”, apresentou menor dispersão em relação à configuração 1, porém para manter-se o mesmo critério de avaliação, aplicou-se o desvio padrão aos dados médios de vazão em “cavitação”.

Então, obteve-se para a vazão média em “cavitação” o valor de 5,72 m³/h, aplicando-se $\pm S$ ($\pm 0,49$ m³/h) sobre a média obteve-se a exclusão de pontos *outliers*. Os pontos *outliers* estão apresentados na cor vermelha na Tabela 20. A Figura 48 apresenta os resultados obtidos com o cálculo dos limites inferior e superior da vazão de cavitação.

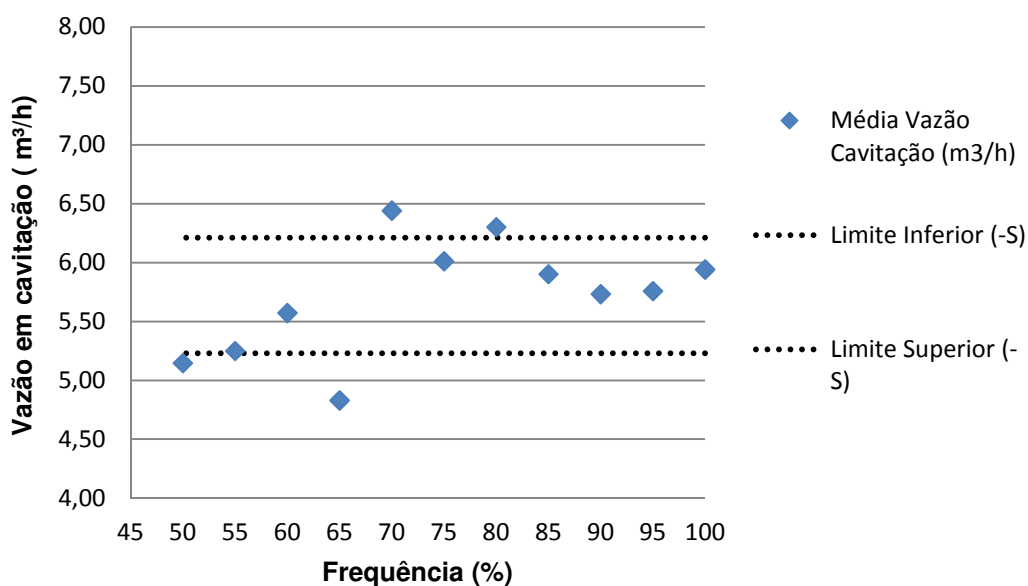


Figura 48 – Limites inferior e superior da vazão de cavitação.
 Fonte: Autor, (2015).

Observa-se que o CE médio “cavitação” (0,38 kWh/m³) apresentou resultado praticamente igual ao CE médio “normal” (0,44 kWh/m³). Entretanto, somente nas faixas de frequência de 60% e 55%, o CE para a situação de “cavitação” apresentou resultados menores que a situação “normal”. Portanto, devido os resultados não apresentar diferença significativa, testou-se o indicador de consumo de energia

normalizado (CEN). A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos para as situações “normal” e de “cavitação”.

Tabela 21 - Resultados obtidos para o indicador CEN aplicado a configuração 2 em situação normal e de cavitação.

Consumo de Energia Normalizado (CEN)							
Freq. (%)	Média Vazão Normal (m ³ /h)	Média Altura Man. (mca)	CEN Normal (kWh/(m ³ /100m))	Média Vazão Cavitação (m ³ /h)	Média Altura Man. (mca)	CEN Cavitação (kWh/(m ³ /100m))	Impacto da Cavitação sobre o consumo "normal"
100	10,56	82,76	0,79	5,94	26,12	1,89	139,9%
95	9,86	77,72	0,74	5,76	26,14	1,68	127,0%
90	9,33	72,60	0,71	5,73	26,09	1,53	113,9%
85	10,31	64,13	0,67	5,90	23,23	1,59	136,0%
80	9,81	59,12	0,68	6,30	23,75	1,44	112,5%
75	9,16	54,66	0,72	6,01	23,79	1,53	114,0%
70	9,64	47,84	0,71	6,44	23,52	1,30	82,6%
65	9,81	44,16	0,69	4,83	16,75	2,16	215,1%
60	10,21	35,99	0,69	5,57	16,94	1,71	146,4%
55	9,56	33,13	0,69	5,25	16,28	1,79	160,3%
50	9,36	26,27	0,77	5,15	14,68	1,78	131,9%

Fonte: Autor,(2015)

O indicador CEN para a condição normal apresentou tendência à redução do consumo, à medida que a velocidade de rotação foi diminuída. Com relação à situação de indução de cavitação, o CEN apresentou dispersão dos resultados. Então, aplicou-se o desvio padrão ($\pm S$, $\pm 4,45$ m³/h) à média das alturas manométrica (21,57 m³/h). As faixas apresentadas em vermelho representam os pontos *outliers*. Dessa forma, o CEN em situação de cavitação apresentou tendência à redução do índice, quando em operação com menores velocidades de rotação. Os valores médios de CEN excluindo os pontos *outliers*, foram respectivamente para situação normal 0,69 kWh/m³/100m, e em situação de cavitação 1,46 kWh/m³/100m. A indução de cavitação ao sistema apresentou um impacto sobre o consumo “normal” de 111,3%, ou seja, houve um aumento no consumo de energia de 111,3%. A Figura 49 apresenta a comparação entre os indicadores CEN em situação de indução à cavitação e em situação de operação normal.

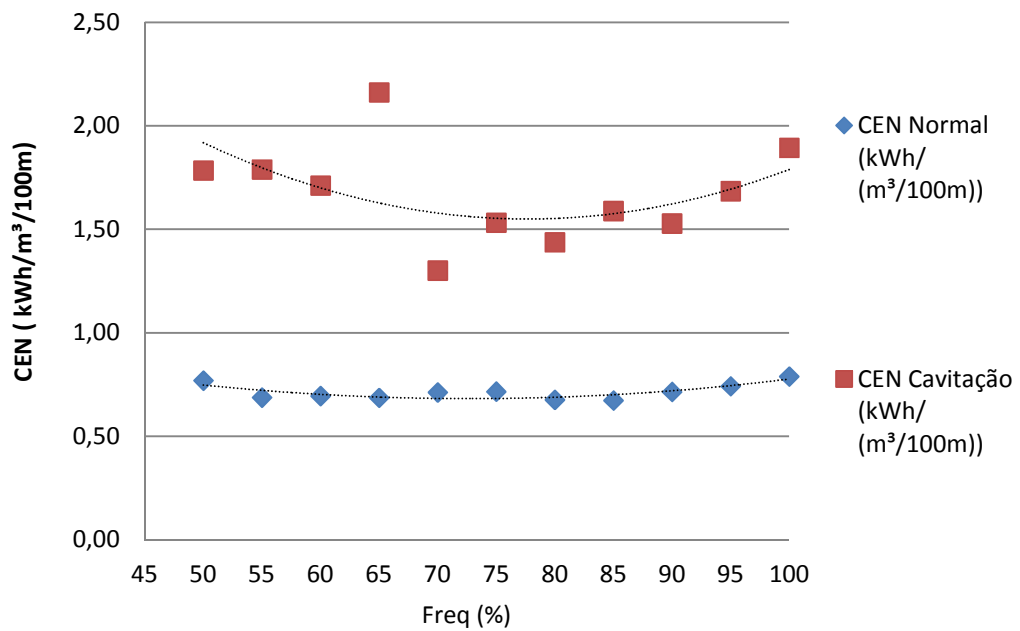


Figura 49 - Comparação entre os indicadores CEN em situação normal e de cavitação.
 Fonte: Autor, (2015)

Os pontos plotados em gráfico na Figura 49 evidenciam o maior consumo energético quando há a indução de cavitação no sistema.

5.6 Comparação entre a Configuração 1 e Configuração 2

A partir dos valores médios obtidos para a vazão em ambas as configurações apresentadas, elaborou-se um gráfico apresentado na Figura 50 ao qual reúne ambas as situações e configurações.

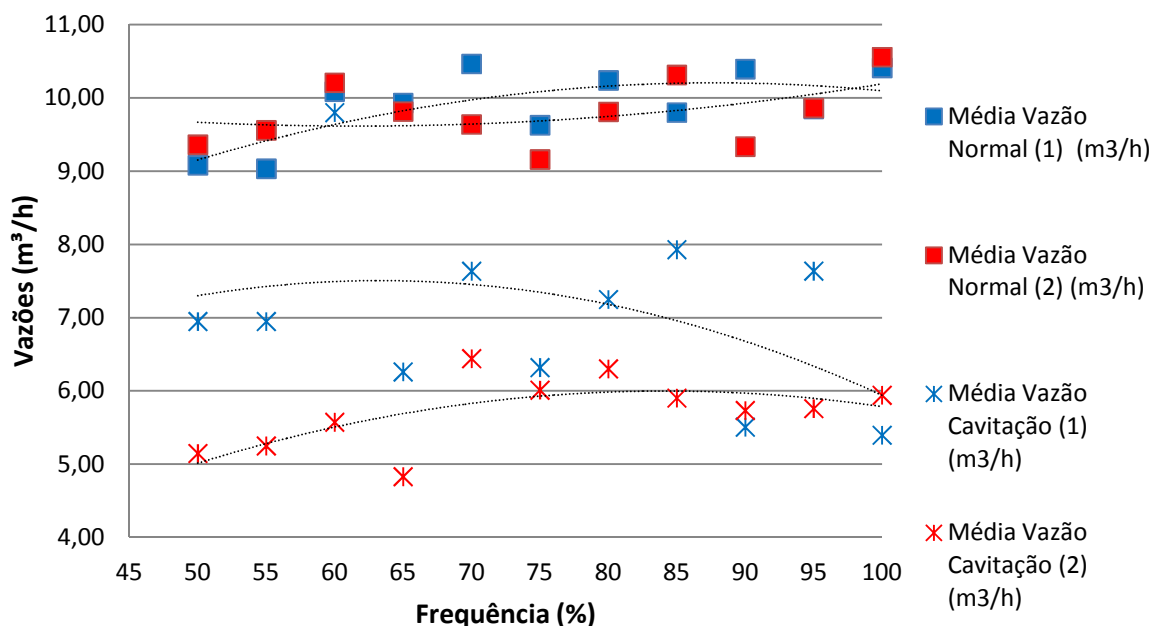


Figura 50 - Comparação entre as vazões apresentadas em ambas às configurações em situação normal e de cavitação
 Fonte: Autor, (2015).

Observa-se na parte superior do gráfico as vazões correspondentes à situação “normal”, o comportamento foi semelhante em ambas às situações, devido à imposição ao sistema em operar próximo as condições nominais. Em relação à cavitação, a vazão para a configuração 2 apresentou menor dispersão entre seus pontos, diferentemente da análise para a cavitação em relação a configuração 1, a qual apresentou a maior dispersão entre seus pontos. Isso se deve, às manobras de fechamento do registro para que assim houvesse indução à cavitação, as quais resultaram em uma variação significativa da vazão para a mesma faixa de frequência entre as diferentes configurações, principalmente em operação a menores velocidades de rotação. A Tabela 22 apresenta a comparação entre os $NPSH_r$ e $NPSH_d$ para as diferentes situações.

Tabela 22 - Comparação de NPSH's entre as configurações 1 e 2 para as situações normal e de cavitação.

Freq. (%)	Configuração 1		Configuração 2	
	NPSH _d Médio Normal (mca)	NPSH _d Médio Cavitação (mca)	NPSH _d Médio Normal (mca)	NPSH _d Médio Cavitação (mca)
100	9,53	0,90	9,52	0,98
95	9,54	0,95	9,52	0,97
90	9,54	1,06	9,52	0,99
85	9,54	1,07	9,51	1,00
80	9,49	0,92	9,51	1,08
75	9,49	1,04	9,52	1,05
70	9,54	1,20	9,50	1,08
65	9,54	1,13	9,59	0,92
60	9,55	1,15	9,62	0,97
55	9,54	1,20	9,62	1,02
50	9,55	1,20	9,82	0,95

Fonte: Autor, (2015)

Quanto ao parâmetro de NPSH_d, comparando-se para uma mesma faixa de frequência e até mesmo, entre as demais faixas, observa-se uma variação de alguns centímetros, exceto para a operação em 50% de frequência de rotação na configuração 2, a qual apresentou uma significativa queda em relação a mesma frequência obtida na configuração 1. O parâmetro de NPSH_r na situação de cavitação para a configuração 1, foi em média 11,3% do valor de NPSH_d desta mesma configuração em situação “normal”, ou seja, foram observadas quedas bruscas na energia de montante à bomba na presença de cavitação.

Com relação ao NPSH_d, observa-se uma maior variação na configuração 1 em situação de cavitação. Para a configuração 2 o parâmetro NPSH_d apresentou valores menores em relação à situação de cavitação, devido às alturas manométricas maiores alcançadas por bombas em série. A Figura 51 apresenta a comparação entre os resultados obtidos para os rendimentos das configurações 1 e 2.

Observa-se que o rendimento normal para a configuração 2 apresentou uma eficiência menor em relação a configuração 1: em média 9,5% menor. A queda no rendimento da configuração 1, em situação de cavitação foi em média 21,4% e para a configuração 2 foi em média 21,6%, uma diferença pouco significativa.

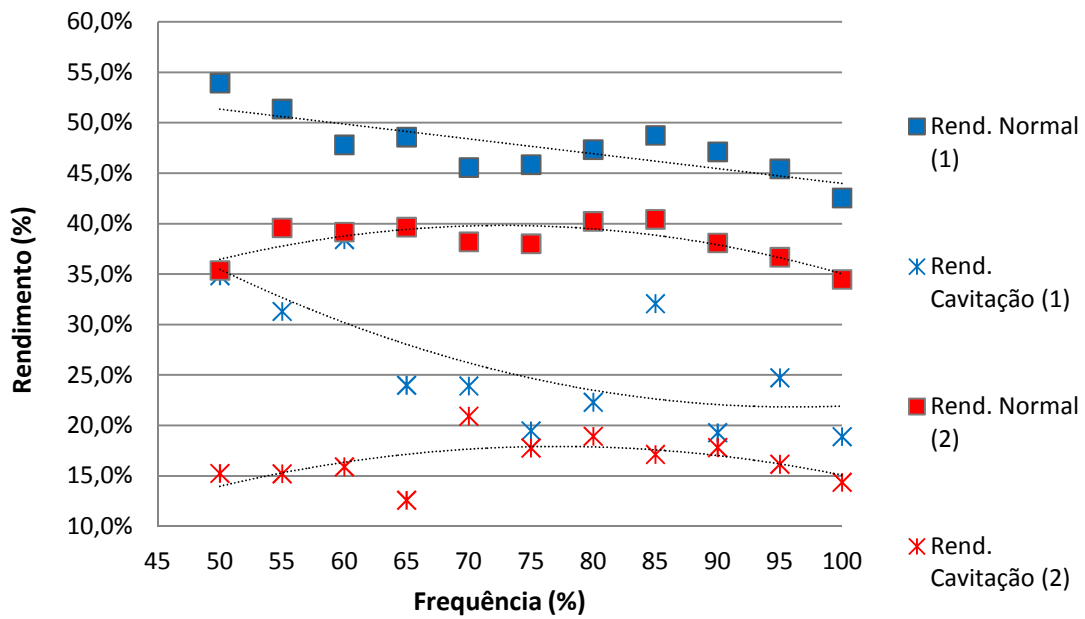


Figura 51 - Comparação entre rendimentos entre as configurações 1 e 2 em situação normal e de cavitação
 Fonte: Autor, (2015).

Na sequência, compararam-se os indicadores energéticos para ambas as configurações e situações. A Figura 52 apresenta o gráfico para o CE em situação “normal”.

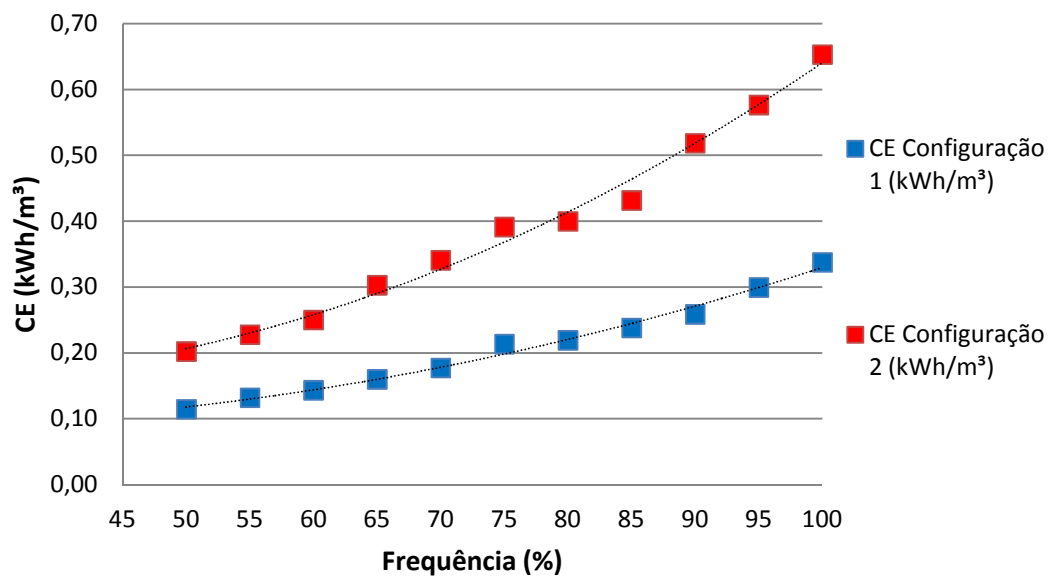


Figura 52 - Comparação entre as configurações 1 e 2 para os indicadores energéticos em situação normal
 Fonte: Autor, (2015).

A análise entre os indicadores CE da configuração 1 e configuração 2 em situação normal, apresentou menor consumo de energia elétrica por metro cúbico bombeado para a configuração 1, devido a utilização de apenas um conjunto motobomba. A economia média de energia elétrica por metro cúbico, em relação à configuração 2 atingiu 46%. A 90% de frequência da configuração 1 ocorreu a maior economia em relação à configuração 2, atingindo 50% de economia em relação à sua correspondente na configuração 2.

A tendência observada para a situação “normal”, também foi observada na situação de “cavitação”. A Figura 53 apresenta a comparação entre as configurações 1 e 2 para a situação de cavitação.

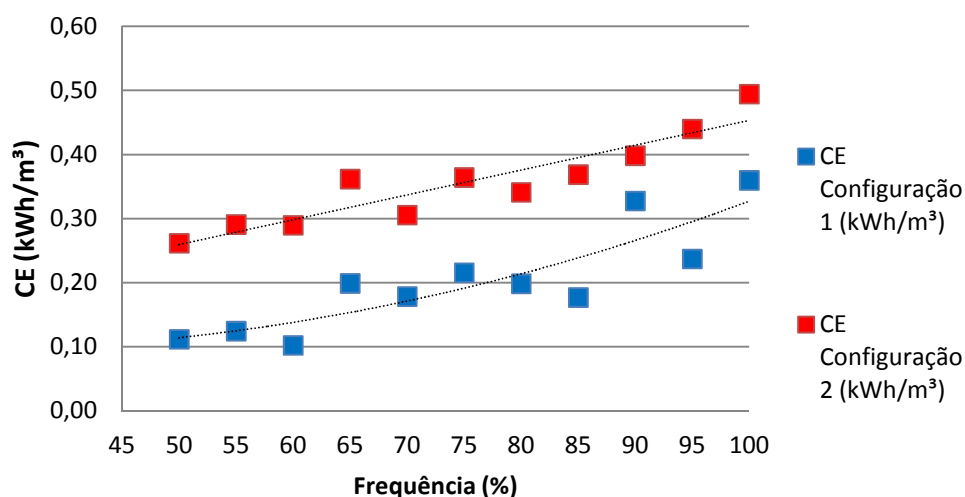


Figura 53 - Comparação entre as configurações 1 e 2 para o CE em situação de cavitação
 Fonte: Autor,(2015).

Os pontos plotados neste gráfico estão apresentados nas Tabelas 15 e 20, são os valores médios. Optou-se por utilizar estes dados, pois após o segundo tratamento estatístico os pontos *outliers*, com sua correspondência a frequência foram diferentes para cada configuração. Assim, seria difícil relacionar parâmetros em faixas diferentes de velocidade. Em relação à configuração 2, o CE apresentou um comportamento quase linear, já em relação a configuração 1 apresentou pontos de dispersão, porém suas linhas de tendência indicam a redução do consumo operando com menores velocidades de rotação. A economia de energia elétrica por metro cúbico bombeado, apresentada pela configuração 1 em relação à

configuração 2 foi de 45%. A 60% para a configuração 1, foi a velocidade de rotação que apresentou maior economia em relação à configuração 2, atingindo um percentual de 65% de economia em relação a sua correspondente na configuração 2.

Então, para as condições e modelos de bombas utilizados nos experimentos, observou-se que para a configuração 1 o melhor ponto de trabalho seria a faixa de frequência de 65% (2039 rpm). Nessa faixa, observou-se um dos maiores valores obtidos para o rendimento do conjunto (48,6%). Consumindo para sua operação 0,16 kWh/m³, valor abaixo da média de 0,19 kWh/m³. Para a configuração 2 a faixa de 85% (3015 rpm) de velocidade de rotação, foi observada com os melhores resultados sob os aspectos de eficiência. O rendimento obtido para os conjuntos foi de 40,4%, o melhor apresentado entre as demais faixas. Para a operação dos conjuntos foi consumido 0,43 kWh/m³, valor semelhante à média de consumo que foi de 0,44 kWh/m³. Entretanto, a consideração para a definição da melhor velocidade de operação, foi realizada sobre as análises de eficiência e consumo energético. Os aspectos referentes a desgaste e manutenção mecânica, não foram analisados.

A análise do indicador CEN para a situação “normal” para as configurações 1 e 2, estão apresentados na Figura 54.

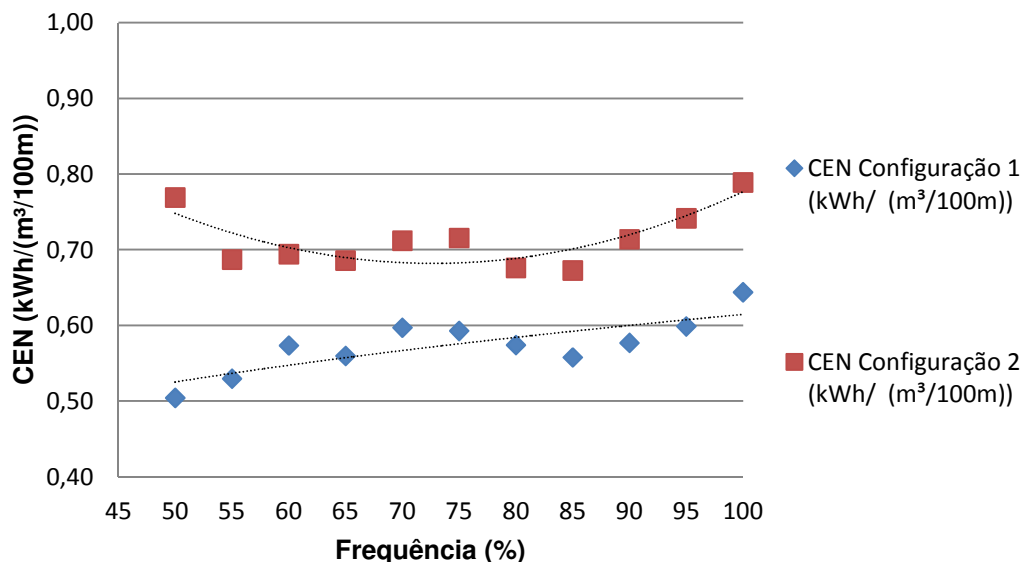


Figura 54 - Comparação entre as configurações 1 e 2 para o CEN em situação normal.
Fonte: Autor,(2015).

O consumo de energia elétrica, manteve-se menor para a operação em situação “normal” da configuração 1 em relação à configuração 2. Em ambas as configurações, foi observada uma dispersão pouco significativa dos dados. No entanto, a configuração 1 apresentou um consumo de energia elétrica 20% menor em relação à configuração 2. Para a configuração 1, observou-se que o melhor rendimento (48,7%) ocorreu na faixa de 85% de velocidade de rotação. A qual obteve para o indicador CEN o valor de 0,56 kWh/m³/100m, valor praticamente igual ao CEN médio que representou o valor de 0,57 kWh/m³/100m. Com relação a configuração 2, a faixa de 85% foi a que demonstrou melhor desempenho. O valor do indicador CEN foi 0,67 kWh/m³/100m enquanto que o CEN médio foi de 0,69 kWh/m³/100m. O rendimento por sua vez, apresentou desempenho de 40,4%. A Figura 55 apresenta a comparação para o indicador CEN entre as configurações 1 e 2 em situação de cavitação.

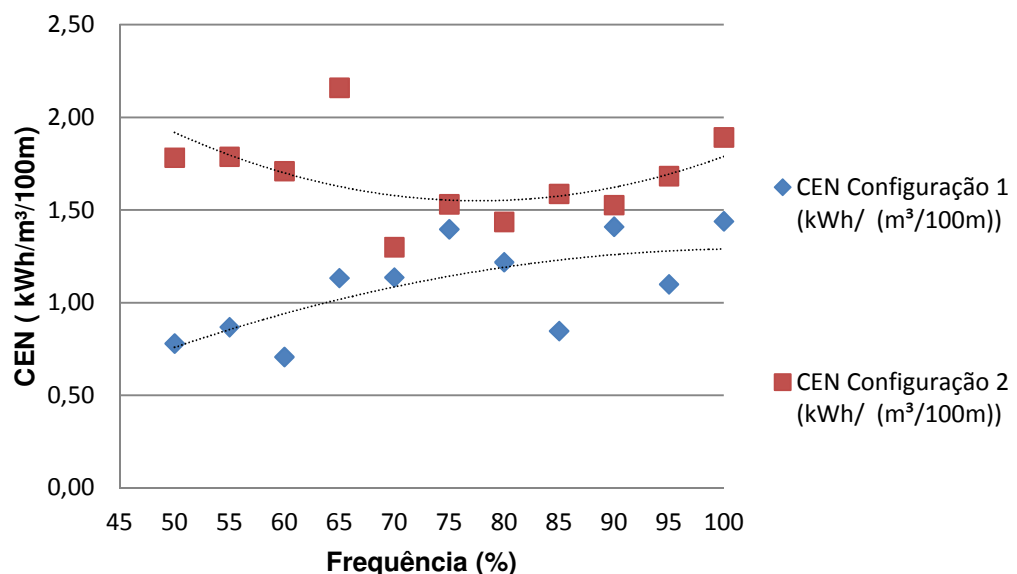


Figura 55 - Comparação entre as configurações 1 e 2 para o CEN em situação de cavitação
 Fonte: Autor, (2015).

A comparação para a situação de cavitação apresentou dispersão entre os dados de ambas as configurações. Em algumas faixas (70%, 75% e 90%) quase houve sobreposição dos valores obtidos para as diferentes configurações. A configuração 1 consumiu 33% a menos de energia elétrica em comparação a configuração 2, ou seja, mesmo com o aumento do consumo devido a indução à

cavitação, a operação da configuração 1 manteve-se mais econômica frente à configuração 2.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Conforme a metodologia apresentada para o cálculo de $NPSH_r$, pode-se concluir que a equação de YEDIDIAH (1996) apresenta uma boa aproximação em caso de dificuldade para a obtenção deste parâmetro. No entanto, diante das alternativas propostas por meio da análise de catálogos de equipamentos disponíveis no mercado, oferece também um bom recurso em caso de ausência dos gráficos de YEDIDIAH (1996). Neste caso, mostrou-se como melhor alternativa, ou seja, menor erro no resultado do parâmetro, em relação à alternativa composta por 03 bombas com diferentes rotações.

A avaliação das equações apresentadas para a estimativa do parâmetro sigma crítico (σ_c), concluiu que os sigmas críticos estudados pouco diferiram entre si, apresentando diferença na terceira casa decimal. Então, dentre as equações apresentadas sugere-se a utilização da equação de MACINTYRE (1982) ou PORTO (2006), seus resultados ocuparam regiões intermediárias as demais equações, respectivamente 0,0324 e 0,0332, enquanto a média resultou em 0,0335. Neste trabalho adotou-se a equação de PORTO (2006) devido aos seus valores estarem próximos a linha média dos σ 's e, também, por ter sua publicação mais atualizada em comparação a MACINTYRE (1982).

O critério de cavitação entre $NPSH$'s mostrou-se mais eficaz que o critério de cavitação entre sigmas, com relação ao diagnóstico de ocorrência da cavitação. A comparação entre sigmas mostrou uma faixa de abrangência menor em relação ao critério de $NPSH$'s. Em algumas frequências, não foi observado pontos de ocorrência de cavitação, podendo assim diagnosticar falsos positivos, ou seja, diagnosticar que não há ocorrência de cavitação quando na verdade, há indícios físicos da ocorrência do fenômeno.

Concluiu-se que o parâmetro número de Thoma (σ) nas condições experimentadas laboratorialmente, aumentou gradativamente ao passo que a velocidade de rotação foi reduzida, afirmando a hipótese de menor tendência a

cavitação em operações com menores velocidades de rotação, visto que, segundo a literatura quanto mais próximo de zero o σ , maior é a intensidade de cavitação.

Concluiu-se, em linhas gerais que o consumo energético por metro cúbico de água bombeado diminuiu com a redução da velocidade de rotação, em ambas as situações abordadas, “normal” e de “indução à cavitação”. Entretanto, a “indução à cavitação” causou impactos sobre o rendimento e o consumo de energia, em comparação a operação “normal” dos conjuntos.

6.2 Conclusões sobre a configuração 1

Considerando-se as características das instalações do LENHS/UFPR, observou-se que para a configuração 1 o parâmetro $NPSH_r$ apresentou em média valores em torno de 18,5% do valor de $NPSH_d$ operando na situação “normal”.

As vazões médias observadas em situação de “indução à cavitação” apresentaram dispersão, dificultando sua relação com outros parâmetros. Para melhor correlação com o CE, foi necessário a utilização de um segundo tratamento estatístico.

O rendimento médio “normal” deste conjunto apresentou valores de 47,7%. Com relação à situação de “cavitação”, a média do rendimento baixou para o valor de 26,3%, ou seja, houve uma queda média do rendimento em “cavitação” com relação à situação “normal” de 21,4%. O ponto crítico das faixas analisadas foi a 90% da velocidade de rotação, a qual apresentou decréscimo do rendimento de 27,8%.

Com relação ao indicador energético CE, obteve-se para o CE “normal” a média de 0,19 kWh/m³, ao passo que para o CE “cavitação” obteve-se a média de 0,18 kWh/m³. A avaliação desse indicador apresentou uma diferença pouco significativa, contudo visto que houve alteração da altura manométrica, decidiu-se aplicar o indicador CEN.

Para o cálculo do CEN, calcularam-se as médias e o desvio padrão sobre as alturas manométricas. Houve a tendência à redução do indicador, conforme a

velocidade de rotação foi reduzida em ambas as situações, indicando assim um menor consumo de energia. Entretanto, o valor médio para o CEN normal excetuando os pontos *outliers* foi de 0,57 kWh/m³/100m, enquanto que a situação de cavitação apresentou o CEN de 1,02 kWh/m³/100m. A indução a cavitação apresentou um impacto sobre o consumo normal de 79,9%, ou seja, houve um aumento no consumo de energia de 79,9%.

6.3 Conclusões sobre a configuração 2

A Configuração 2 apresentou maior quantidade de dados em situação de “cavitação”, sugerindo assim, uma maior probabilidade de ocorrência de cavitação neste tipo de arranjo.

Em situação de “indução à cavitação” apresentou menores valores para o NPSH_d, devido às maiores alturas manométricas alcançadas por motobombas em série e também, devido à menor vazão.

O rendimento médio “normal” desses conjuntos apresentou valores de 38,2%. Com relação à situação de “cavitação”, a média do rendimento baixou para o valor de 16,6%, ou seja, houve uma queda média do rendimento em “cavitação” em relação à situação “normal” de 21,6%. O ponto crítico das frequências analisadas foi a 65% da velocidade de rotação, a qual apresentou decréscimo do rendimento de 27,1%.

Com relação ao indicador energético, obteve-se para o CE “normal” a média de 0,44 kWh/m³, ao passo que para o CE “cavitação” obteve-se a média de 0,38 kWh/m³. O indicador não apresentou diferença significativa, então o indicador CEN foi aplicado.

Para o indicador CEN, foi aplicado o desvio padrão ao cálculo da média das alturas manométricas, executando assim, os pontos *outliers*. Para a situação normal o CEN médio foi de 0,69 kWh/m³/100m, a situação de cavitação apresentou o CEN médio de 1,46 kWh/m³/100m. A indução a cavitação do sistema apresentou impacto sobre o consumo normal de 111,3%, ou seja, houve um aumento no consumo de energia de 111,3%.

6.4 Conclusões sobre a comparação entre as configurações 1 e 2

As vazões observadas para a configuração 2 em situação de “cavitação” apresentaram maior uniformidade entre as leituras médias dos seus pontos. Fato não observado com relação à configuração 1, que apresentou dispersão entre seus pontos.

A comparação entre $NPSH_d$ para a situação “normal” não apresentou diferença significativa, apenas alguns centímetros. Com relação à situação de “cavitação”, em média o $NPSH_d$ para a configuração 1 obteve valores médios de 1,07 mca, enquanto para a configuração 2 a média foi de 1,00 mca.

Observa-se que o rendimento “normal” para a configuração 2 apresentou eficiência menor em relação a configuração 1, em média 9,5% menor. A redução no rendimento da configuração 1, em situação de “cavitação” foi em média 21,4% e para a configuração 2 a média foi 21,6%.

A análise entre os indicadores CE da configuração 1 e configuração 2 em situação “normal”, apresentou menor consumo de energia elétrica por metro cúbico bombeado para a configuração 1, devido a utilização de 1 conjunto motobomba. A economia média de energia elétrica por metro cúbico, em relação à configuração 2 atingiu 46%. Na frequência de 90% de velocidade de rotação da configuração 1 ocorreu a maior economia em relação à configuração 2, atingindo um percentual de 50% de economia em relação à sua correspondente na configuração 2. Para o indicador CEN, foi observado o mesmo comportamento, entretanto o percentual CE economia da configuração 1 em relação à configuração 2 foi de 20%.

Essa tendência também foi observada na situação de “indução à cavitação”. A economia de energia elétrica por metro cúbico bombeado, apresentada pela configuração 1 em relação à configuração 2 foi de 45%. A 60% para a configuração 1, foi a velocidade de rotação que apresentou maior economia em relação à configuração 2, atingindo um percentual de 65% de economia em relação à sua correspondente na configuração 2.

Então, concluiu-se que para as condições e modelos de bombas utilizados nos experimentos, observou-se que para a configuração 1 houve dois bons pontos

de trabalho. Considerando a questão de rendimento e o indicador CE, observou-se que a frequência de 65% apresentou os melhores resultados entre as demais velocidades analisada. O rendimento para esta velocidade de rotação foi de 48,6%, consumindo para a sua operação 0,16 kWh/m³, valor abaixo da média de 0,19 kWh/m³. Para a configuração 2, a frequência de 85% foi a qual apresentou melhor rendimento (40,4%), consumindo para sua operação 0,43 kWh/m³, valor semelhante a média de consumo que foi de 0,44 kWh/m³. Contudo, considerando o indicador CEN e o rendimento, a configuração 1 apresentou a frequência de 85% de velocidade de rotação como a melhor alternativa em relação as demais analisadas. Para esta velocidade foi observado o rendimento de 48,7%, consumindo 0,56 kWh/m³/100m. Para a configuração 2, foi observada a mesma frequência utilizando os critérios de CE e rendimento, ou seja, 85%. Nessa velocidade de rotação, observou-se o CEN de 0,67 kWh/m³/100m, abaixo do CEN médio de 0,69 kWh/m³/100m. Entretanto, as velocidades de rotação indicadas como as de melhor eficiência neste trabalho, foram consideradas somente as questões de rendimento e indicadores energéticos. O desempenho e desgaste mecânico não foram contemplados neste trabalho.

Portanto, conclui-se que a cavitação não é somente um fenômeno dispendioso quanto à questão de manutenção mecânica como relatado na literatura, como também, proporciona impactos significativos sobre o consumo de energia elétrica do conjunto.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em um sistema de abastecimento de água, em caso de redução na vazão aduzida ou recalçada, devido a questões de demanda, sugere-se a utilização de equipamentos, tais como conversores de frequência para esta redução. Caso essa redução seja realizada por manobras manuais em registros à montante dos conjuntos motobomba, poderá haver ocorrência de cavitação, pois esta manobra altera o $NPSH_d$ ao qual aquele sistema fora projetado.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de experimentos em conjuntos motobomba em série e em paralelo de maior porte. O estudo em uma ETA em operação seria muito interessante.

REFERÊNCIAS

ABDELMEGUID, H.; ULANICKI, B. **Feedback rules for operation of pumps in a water supply system considering electricity tariffs**, Water Distribution System Analysis 2010, Tucson, AZ, USA, Sept. 12-15, 2010.

ABNT. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 12.216/1992 Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público**, Brasil, 1992.

ABNT. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 6400/1989 Bombas hidráulicas de fluxo de (classe C) – ensaios de desempenho e de cavitação**, Brasil, 1989.

AISSE, M. M.; BRAGA, S. M.; **Conceitos de hidráulica aplicada ao saneamento ambiental, Apostila do Departamento de Hidráulica e Saneamento**, Universidade Federal do Paraná, 2013.

ALCOVER JR., P. R. C.; PUKASIEWICZ, A. G. M.; **Avaliação da Resistência à cavitação acelerada ASTM G32-03 de aços com diferentes composições químicas e microestrutura**, XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2012.

ALMEIDA, P. L. C.; **Optimização da operação de uma estação elevatória, minimização do custo da energia respeitando critérios de qualidade da água**, Dissertação de mestrado, Universidade do Porto, 2010.

ARRAIS, F. S. S.; **Aspectos determinantes para o consumo de água de beber**, Dissertação de mestrado, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2011.

BALL, J. W.; STRIPLING, T.; TULLIS, J. P.; **Predicting cavitation in sudden enlargements**, Journal of Hydraulics Division, v. 101, n.7, p.857-870, 1975.

BID, Banco Interamericano de Desenvolvimento, **Avaliação de sistemas de bombeamento de água – Manual de eficiência energética**, 1ª edição, Washington – USA, 2011.

BRENNEN, C. E.; **Cavitation and bubble dynamics**, Oxford University Press, 1995.

BUHAGIAR, M.; **Coping with poor suction conditions or low NPSH**, Revista World Pumps, p. 30-32, 06/2005.

BYARS, P.; ANTIZAR-LADISLAO, B.; **Water Treatment and Supply: Intermediate Education in Sub-Saharan Africa**, Water Science and Technology: Water Supply (5): 578-585, 2011.

CANNIZZARO, D.; PEZZINGA, G.; **Energy dissipation in transient gaseous cavitation**, Journal of Hydraulic Engineering, 131, p. 724-732, 2005.

CARMO, R. L.; DAGNINO, R. S.; JOHANSEN, I. C.; **Transição demográfica e transição do consumo urbano no Brasil**, Revista Brasileira de Estudos de População, v. 31, n.1, p. 169-190, Rio de Janeiro, 2014.

COELHO, W.R., **Análise do Fenômeno de Cavitação em Bomba Centrífuga**, Acervo Digital da Universidade Est. Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp), http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bis/33004099082P2/2006/coelho_wr_dr_ilha_prot.pdf, 2006, acesso em 16/03/2014.

CORCORAN, L.; COUGHLAN, P.; MCNABOLA, A., **Energy recovery potential using micro hydropower in water supply networks in the UK and Ireland**, Water Science and Technology: Water Supply (2): 552-560, 2013.

CURITIBA ANTIGA - <http://www.curitibaantiga.com/fotos-antigas/95/Praca-Zacarias-Curitiba-inaugurada-em-1871-com-o-nome-de-Largo-do-Chafariz.html>, acesso em 19/10/20185.

DEMEC/UFPR, Departamento de Engenharia Mecânica, **Apostila de Máquinas Hidráulicas**, Universidade Federal do Paraná, disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/APOSTILA_MH/CAVITA_O.ppt, acesso em 22/07/2015.

DIAS, R. A., **Impactos da substituição de equipamentos na conservação de energia**, Dissertação de mestrado em engenharia mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1999.

ELETROBRÁS. PROCEL, 2005, **Eficiência Energética no Saneamento Básico – SABESP – Projeto Santana – Casos de Sucesso**, n. 6, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

EPE. EPE – Empresa de Pesquisa Energética, **Balço Energético Nacional - Relatório Síntese Ano Base 2014**, Brasília – Brasil, 2015.

FALVEY, H.T., **Cavitation in Chutes and Spillways**, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1990.

GALVÃO, M. A. M., **Origem das políticas de saúde pública no Brasil: do Brasil - Colônia a 1930, textos do departamento de ciências médicas**, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2007.

GARCIA, A. G. P., **Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria**, Dissertação de Mestrado da UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

GERBENS-LEENES, P.W.; HOEKSTRA, A. Y.; **The water footprint of energy from biomass: a quantitative of assessment and consequences of an increasing share of bioenergy in energy supply**, Ecological Economics 68, 1052-1060, 2009.

GLEICK, P.H., **Water and Energy**, Annual Review of Energy and Environment, v.19, p.267-299, 1994.

GOMES, H. P.; **Sistemas de Bombeamento Eficiência Energética**, Editora Universitária, Universidade Federal Paraíba, 2009.

HOEKSTRA, A.Y., HUNG, P.Q., **Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations of in relation to international crop trade**, Value of water research report series N° 11, IHE Delft, 2002.

HOFFMAN, A. R., **The Connection: Water Supply and Energy Reserves**, U.S. Department of Energy (DOE), disponível em: <http://www.waterindustry.org/Water-Facts/world-water-6.htm>. Acesso: 14/08/2015.

Hydraulic Institute Standards, **Hydraulic Institute Standards for centrifugal, rotary and reciprocating pump**, 14 Edition. 1982.

KARASSIK, I. J.; MESSINA, J. P.; COOPER, P.; HEALD, C. C., **Pump Handbook**, McGRAW-HILL, 3ª Edição, 2001.

LANDI, F. R.; **A Evolução Histórica das Instalações Hidráulicas**, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1993.

LIMA, G. M., VIANA, A. N. C., DIAS JR., R. S. C., LUVIZOTTO JR., E., **Classification of water supply systems based on energy efficiency**, Water science & technology: water supply, disponível online , acesso em 27/10/2015, june/2015.

LINGIREDDY, S; WOOD, D. J., **Improved operation of water distribution systems using variable speed pumps**, Journal of Energy Engineering, 124, p. 90-103, 1998.

LOPES, A. L. B., **“Sanear, prever e embelezar”**: o engenheiro Saturnino de Brito, o urbanismo sanitaria e o novo projeto urbano do PRR para o Rio Grande do Sul (1908-1929), tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2013.

MACINTYRE, A. J.; **Bombas e Instalações de Bombeamento**, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 1997.

MARCHEGANI, A. R.; **Cavitación**, Apostila de Maquinas hidráulicas, Universidad Nacional del Comahue, Argentina, 2006.

MARCOLI, E.; ROBAINA, A.D. **Consumo de energia e eficiência das estações de bombeamento de lavouras e arroz irrigado**. Revista Ciência Rural, v.32, p. 229-235, 2002.

MCNALLY, W.; **Operating with a low NPSH**, Revista World Pumps, p. 27-28, 03/2004.

MESA, D. H.; GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; **Avaliação da resistência ao desgaste erosivo gerado por cavitação em aços inoxidáveis austeníticos com alto teor de nitrogênio: estudo dos mecanismos de desgaste**, REM – Revista Escola de Minas, 63(1), p. 147-152, 2010.

MISQUIATI, D.L.; **Análise das condições operacionais de bombas hidráulicas de fluxo radial de grande porte**, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

MORRO DE SÃO PAULO, Portal da cidade de Morro de São Paulo - **História e Monumentos**, <http://www.morrodesaopaulo.com.br/>, (acesso em 07/07/2015).

MS. MS – Ministério da Saúde, **Portaria N° 2914/2011**, Brasil, 2011.

NAZIF, S.; KARAMOUZ, M.; TABESH, M.; MORIDI, A.; **Pressure management model for urban water distributions networks**, Water Resour Manage, 24, p. 437-451, 2010.

NOLL, V.; **Motores Elétricos**, Apostila Pós-Técnico em Automação Industrial, CEFET/SC, S/D.

NOSOV, V. R.; GÓMEZ-MANCILLA, J. C.; MEDA-CAMPANA, J. A., **Occurrence of hydrodynamic cavitation**, Water Science and Technology: Water Supply (3): 595-601, 2011.

OLIVEIRA FILHO, D.; RIBEIRO, M. C.; MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. A.; FERNANDES, H. C. **Dimensionamento de motores para bombeamento de água**, Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal - Brasil, v.30, n.6, p.1012-1022, 2010.

OLIVEIRA, B. L.; **Estações Elevatórias: características construtivas e geração de ruído**, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2010.

PLAPPALLY, A. K.; LIENHARDT V, J.H.; **Costs for water supply, treatment, end-use and reclamation**, International Conference on Desalination for the Environment, Clean Water and Energy, European Desalination Society, Barcelona - Espanha, Abril 23–26, 2012.

PORTAL DO ELETRICISTA, <http://www.portaleletricista.com.br/motores-de-inducao/>, acesso 22/10/2015.

PORTO, R. M.; **Hidráulica Básica**, 2ª edição, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

PRASAD, T. D., **Design of pumped water distribution networks with storage**, Journal of Water Resources Planning and Management, 136, p. 129-132, 2010.

PREIS, A.; WHITTLE, A.; OSTFELD, A., **Multi-objective optimization for conjunctive placement of hydraulic and water quality sensors in water distribution systems**, Water Science and Technology: Water Supply (2): 166-171, 2011.

PROCEL. PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, **Resultados PROCEL 2015**, Rio de Janeiro – Brasil, 2015.

RAMOS, J. S.; RAMOS, H. M.; **Multi-criterion optimization of energy management in drinking systems**, Water Science and Technology: Water Supply, 10(2), p. 129-143, 2010.

ReCESA. ReCESA – Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental, **Operação e manutenção de estações elevatórias de água Nível 1**, Belo Horizonte – Brasil, 2008.

RIBEIRO, J. W., ROOKE, J. M. S., **Saneamento básico e sua relação com o meio ambiente e saúde pública, especialização em análise ambiental**, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, 2010.

RIBEIRO, M. A.; **Válvulas de controle e segurança**, 5ª edição, Salvador, 1999.

RODRIGUES W., LUVIZOTTO JR E., **Inversor de frequência em sistemas e bombeamento**, 33ª Assembléia da ASSEMAE, 2003

RODRIGUES, R.C.; **Análise do desempenho hidroenergético de sistemas de abastecimento de água no município de Marabá/PA**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém/PA, 2012.

SALLES, M. J., **Política Nacional de Saneamento: percorrendo caminhos em busca da universalização**, tese de doutorado, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro – RJ, 2008.

SANEPAR – Companhia de saneamento do Paraná, <http://site.sanepar.com.br/a-sanepar/memoria>, acesso em 19/10/2015.

SANEPAR, SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná, **Press Release 1T 2015**, <http://site.sanepar.com.br/investidores/informacoes-financeiras/relatorios-trim-anuais>, (acesso em 15/06/2015).

SCHAGEN, K. V.; RIETVELD, L.; VEERSMA, A.; BABUSKA, R., **Control-design methodology for drinking-water treatment processes**, Water Science and Technology: Water Supply (2): 121-127, 2010.

SILVA, F. G. B.; ARENS, H. G.; NEVES, L. A; **Curva NPSH(Q) de uma bomba centrífuga radial para rotações não padronizadas**, RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 7, n.2, 2002.

SNIS. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento; **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto 2013**, Brasília – Brasil, 2014.

STEPANOFF, A. J. **Cavitation in centrifugal pumps with liquids other than water**. Trans. ASME, v. 83, 1961.

SULZER, P.L.; **Centrifugal pump handbook**, Elsevier, 3ª edição, Switzerland, 2010. Trans. ASME, v. 78, 1956.

SULZER, **www.sulzer.com**, acesso em 20/10/2015.

TSUTIYA, M. T.; **Abastecimento de água**, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – Brasil, 2006.

TUNDISI, J.; **Água no século 21: Enfrentando a escassez**, São Carlos: RIMA/IIIE, 2003.

UNESCO. UNESCO - United Nations Educational, **Scientific and cultural organization**; Water for a Sustainable World, Paris - France, 2015.

UNESP, **Ensaio com bombas em paralelo**, São Paulo, S/D.

VILANOVA, M.R.N., BALESTIERI, J.A.P., **Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.30, 701-7014, 2014.

WEG, **Catálogo de Inversores**, (<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/CFW08>) acesso em 06/08/2015.

WIDDERN, H.; CARDINAL VON. **On cavitation in centrifugal pumps**. Escher-Wyss News, março, 1936.

WISLICENUS, G.F. **Critical Considerations on Cavitation Limits of Centrifugal Pumps**. Trans. ASME, v.78,1956.

WORLD BANK. WORLD BANK – **The International Bank for Reconstruction and Development, A Primer on Energy Efficiency for Municipal Water and Wastewater Utilities**, Washington - USA, 2012.

WYLIE, E. B.; **Low void fraction two-component two-phase flow**, Unsteady flow and fluid transients, R. Bettess and J. Watts, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 3–9, 1992.

YEDIDIAH, S.; **Centrifugal Pump User's Guidebook problems and solutions Chapman and Hall**, 1^a edition, New York, 1996.

ZAHER, M.; **A new centrifugal pump design for successful operation under low NPSH conditions**, Revista World Pumps, p. 26-31, 05/2000.

APÊNDICE

6. 5 Tabela modelo elaborada para o tratamento dos dados.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
3512,1	13:50:01	33,8	10,2	0,2	43,1	9,5	53,0	9,4	0,0224	0,6	9,5	1,8	0,1803	Normal	Normal
3509,4	13:50:03	33,8	10,2	0,1	43,1	9,5	52,9	9,5	0,0225	0,6	9,5	1,8	0,1794	Normal	Normal
3505,1	13:50:04	33,9	10,3	0,2	43,2	9,5	53,1	9,4	0,0224	0,6	9,6	1,8	0,1801	Normal	Normal
3504,7	13:50:04	33,7	10,3	0,2	43,1	9,5	52,9	9,5	0,0225	0,6	9,5	1,8	0,1799	Normal	Normal
3510,5	13:50:07	33,9	10,3	0,2	43,2	9,5	53,1	9,5	0,0226	0,7	9,5	1,8	0,1796	Normal	Normal
3512,1	13:50:07	33,6	10,3	0,2	43,0	9,5	52,8	9,5	0,0226	0,6	9,5	1,8	0,1802	Normal	Normal
3510,2	13:50:09	33,7	10,3	0,2	43,0	9,5	52,9	9,5	0,0226	0,6	9,5	1,8	0,1802	Normal	Normal
3507,8	13:50:09	33,7	10,3	0,2	43,1	9,5	52,9	9,5	0,0226	0,7	9,5	1,8	0,1797	Normal	Normal
3506,6	13:50:12	34,2	10,3	0,2	43,5	9,5	53,4	9,4	0,0224	0,6	9,6	1,8	0,1792	Normal	Normal
3504,7	13:50:13	33,8	10,4	0,2	43,2	9,5	53,0	9,5	0,0226	0,7	9,5	1,8	0,1798	Normal	Normal
3501,6	13:50:13	33,8	10,4	0,2	43,1	9,6	53,0	9,5	0,0226	0,7	9,6	1,8	0,1810	Normal	Normal
3504,3	13:50:14	33,9	10,4	0,2	43,2	9,5	53,1	9,5	0,0226	0,7	9,5	1,8	0,17988	Normal	Normal
3498,8	13:50:16	34,0	10,3	0,2	43,4	9,5	53,2	9,4	0,0224	0,6	9,5	1,8	0,17868	Normal	Normal
3502,3	13:50:17	33,9	10,3	0,2	43,2	9,5	53,1	9,5	0,0225	0,6	9,5	1,8	0,17927	Normal	Normal
3502,0	13:50:18	33,7	10,4	0,2	43,0	9,5	52,9	9,5	0,0227	0,7	9,5	1,8	0,18009	Normal	Normal
3501,2	13:50:19	33,9	10,4	0,2	43,2	9,5	53,1	9,5	0,0226	0,7	9,5	1,8	0,17978	Normal	Normal
3500,8	13:50:22	33,8	10,3	0,2	43,1	9,5	53,0	9,5	0,0226	0,6	9,5	1,8	0,17975	Normal	Normal
3500,8	13:50:22	33,9	10,3	0,2	43,2	9,5	53,1	9,5	0,0225	0,6	9,6	1,8	0,18003	Normal	Normal
3497,7	13:50:23	34,0	10,3	0,1	43,3	9,5	53,2	9,5	0,0225	0,6	9,5	1,8	0,1787	Normal	Normal
3499,2	13:50:25	33,6	10,3	0,2	43,0	9,5	52,8	9,5	0,0227	0,7	9,5	1,8	0,18054	Normal	Normal
3520,7	13:50:26	33,6	10,3	0,2	42,9	9,6	52,9	9,5	0,0226	0,6	9,6	1,8	0,1816	Normal	Normal
3516,0	13:50:27	33,6	10,3	0,2	42,9	9,5	52,8	9,5	0,0227	0,6	9,5	1,8	0,18064	Normal	Normal
3509,8	13:50:30	34,0	10,3	0,2	43,3	9,5	53,2	9,5	0,0225	0,7	9,5	1,8	0,17957	Normal	Normal
3501,2	13:50:31	33,7	10,3	0,2	43,0	9,5	52,9	9,5	0,0226	0,6	9,5	1,8	0,1798	Normal	Normal
3498,0	13:50:31	33,7	10,3	0,2	43,0	9,5	52,9	9,5	0,0226	0,6	9,5	1,8	0,18009	Normal	Normal
3498,0	13:50:32	33,8	10,3	0,2	43,1	9,5	52,9	9,5	0,0226	0,6	9,5	1,8	0,17997	Normal	Normal
3496,1	13:50:34	33,9	10,4	0,2	43,2	9,5	53,1	9,5	0,0226	0,7	9,5	1,8	0,17938	Normal	Normal
3501,6	13:50:36	33,8	10,3	0,2	43,2	9,5	53,1	9,5	0,0226	0,7	9,6	1,8	0,18035	Normal	Normal

As numerações das colunas representam:

1. Potência elétrica (W);
2. Hora;
3. Pressão relativa de recalque (mca);
4. Vazão (m³/h);

5. Pressão relativa de sucção (mca);
6. Pressão absoluta de recalque (mca);
7. Pressão absoluta de sucção (mca);
8. Altura manométrica (mca);
9. Rotação específica;
10. Sigma crítico;
11. Velocidade de sucção (m/s);
12. NPSHd (mca);
13. NPSHr Yedidiah (mca);
14. N° de Thoma;
15. Comparação de Thoma;
16. Comparação de NPSH;

6.6 Tabela de equipamentos utilizados nos experimentos:

6.7

EQUIPAMENTO	MODELO	FAIXA DE MEDIÇÃO
Medidor de pressão	IT-TR	-10 A 80 MCA
Medidor de vazão	IFC- 010C	0 A 50 m ³ /h
Analizador de grandezas elétricas	SAGA4500	-
Tacômetro	DT-6236B	-

6. 8 Trabalhos publicados

Título: ESTUDO DA CAVITAÇÃO EM BOMBA CENTRÍFUGA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE O RENDIMENTO

28° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

Autores: Cinthia Aparecida de Lima

Daniel Costa dos Santos

Sergio Michelotto Braga

Título: ANÁLISE DA CAVITAÇÃO EM UMA BOMBA CENTRÍFUGA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

XIII Simpósio Iberoamericano de Redes de Água, Esgoto e Drenagem

Autores: Cinthia Aparecida de Lima

Daniel Costa dos Santos

José Junji Ota

Gustavo Rafael Collere Possetti