

XI-035 – ESTUDO DA CAVITAÇÃO EM BOMBA CENTRÍFUGA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE O RENDIMENTO

Cíntia Aparecida de Lima⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestranda no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (PPGERHA/UFPR).

Daniel Costa dos Santos⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (USP) e pós-doutorado no Institute for Water Education, UNESCO IHE, Holanda. Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR.

Sérgio Michelotto Braga⁽³⁾

Engenheiro Eletricista Industrial, com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações (CEFET/PR). Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA/UFPR). Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA/UFPR). Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR.

Endereço⁽¹⁾: Rua José Milek Filho, 1260 – Campina do Arruda – Almirante Tamandaré - PR - CEP: 83505-000 - Brasil - Tel: (41) 3657-9239 - e-mail: cinthialima@ufpr.br

RESUMO

A cavitação é uma das causas possíveis de erosão em pás, rotores e carcaça de bombas. Em alguns casos o grau de deterioração atingido é tão alto, que a manutenção torna-se inviável, sendo necessária a substituição da bomba. Porém, mesmo em menor grau de ocorrência, este fenômeno é indesejável por impactos e alterações diversas causados à instalação hidráulica. O presente artigo comparou situações de sistemas operando com e sem indução de cavitação, utilizando-se dois arranjos diferentes de conjuntos motobomba operando em laboratório. A indução de cavitação causou reduções significativas no rendimento do conjunto, em média a queda de rendimento foi de 21,4%.

PALAVRAS-CHAVE: Cavitação, Eficiência Energética, NPSH, Rendimento, Rotação.

INTRODUÇÃO

A palavra cavitação, segundo Coelho (2006) deriva do latim *cavus* – cavidade. Ocorre quando um líquido a certa temperatura em escoamento, passa por uma região de baixa pressão chegando a atingir a sua pressão de vapor, então formam-se bolhas de vapor ou cavidades, as quais provocam redução da massa específica do líquido. Estas bolhas são arrastadas pelo escoamento até atingirem regiões em que a pressão local é maior que a pressão a qual foram originadas. Esta brusca variação de pressão provoca o colapso das bolhas por um processo de implosão. O processo entre a criação até a implosão é extremamente rápido, sendo este denominado *cavitação*.

O processo de cavitação pode ser compreendido fazendo uma comparação com o processo de ebulição da água. Quando aquecemos a água elevando a sua temperatura, ocorre em consequência disto, um aumento de sua pressão de vapor.

Quando a pressão local iguala-se à pressão de vapor ocorrerá a ebulição. Então neste ponto de ebulição a água transforma-se em vapor, esta mudança de estado físico ocorre primeiramente em pontos localizados dentro da água, observa-se tal situação pela formação de pequenas bolhas. A temperatura à qual ocorre a ebulição é função da pressão, quando a pressão diminui a ebulição irá ocorrer a temperaturas cada vez mais baixas. Portanto quanto maior a altitude, menor a pressão atmosférica e menor a temperatura de ebulição da água, ou seja, menor sua pressão de vapor.

Embora estas cavidades sejam formadas na água por fervura, ocorrendo o processo quando a pressão local atinge à pressão de vapor da água, existe uma diferença técnica entre fervura e cavitação. A fervura é o processo de passagem do estado líquido para o estado de vapor, aumentando-se à temperatura e mantendo a pressão constante. A cavitação é o processo de passagem do estado líquido para o estado de vapor, alterando a pressão e mantendo-se a temperatura constante. Nas estruturas hidráulicas a água contém bolhas microscópicas de ar e vários tipos de impurezas, com tamanhos variados. Uma vez iniciada a vaporização, o fator mais importante na formação da bolha de cavitação é o seu crescimento.

O desaparecimento dessas bolhas ocorre junto às paredes da tubulação ou quando encontram partes rodantes das bombas (rotor). Quando o colapso de uma bolha ocorre em contato com a superfície sólida, uma pequena área desta superfície é momentaneamente exposta a uma tensão de tração extremamente elevada, com a repetição deste efeito em forma contínua, por inúmeras bolhas, dá-se início a um processo erosivo por martelagem. O colapso das bolhas é acompanhado de ondas acústicas, provocando um barulho característico nas instalações.

A cavitação uma vez instalada em um sistema provoca um desgaste excessivo no rotor da bomba, exigindo manutenção periódica e dispendiosa. Algumas vezes o grau de deterioração atinge um nível tão alto, que sua correção torna-se inviável, pois exigiria profundas alterações na montagem, como por exemplo, rebaixamento da cota de instalação da bomba.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no laboratório LENHS/UFPR, onde não há a ocorrência espontânea do fenômeno de cavitação. A bomba utilizada é 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 motor de 3500 rpm. O conjunto motobomba é alimentado por um reservatório de água conectado ao conjunto. O líquido bombeado é conduzido por uma linha de adução, que consta de um tubo de aço de 75 mm de diâmetro, na qual estão instalados transdutores de pressão, posição anterior (faixa de medição de -10 / 10 mca) e posterior ao conjunto motobomba (faixa de medição de -10 mca / 80 mca) e medidor de vazão, como pode ser observado Figura 1, a qual apresenta as instalações do sistema utilizado para o estudo. Na entrada da sucção e após o medidor de vazão, foram instalados dois registros de gaveta para regulagem da vazão de água e imposição das condições de cavitação.

Conforme experimentos, utilizando a configuração normal deste sistema não haveria a cavitação. Portanto, para induzi-la um registro de gaveta foi instalado a montante da bomba de forma a reduzir o fluxo de água na sucção, e consequentemente, minimizar a pressão no sistema, induzindo o sistema a cavitação.

Para o desenvolvimento dos ensaios, inicialmente o conjunto motobomba foi configurado para os parâmetros de funcionamento semelhantes aos indicados pelo fabricante. Para a vazão próxima a 10 m³/h e frequência de rotação do motor em 100%, o sistema era mantido em funcionamento por aproximadamente 5 minutos, sendo os parâmetros de vazão, pressão e dados elétricos, simultaneamente registrados em plataforma computacional.

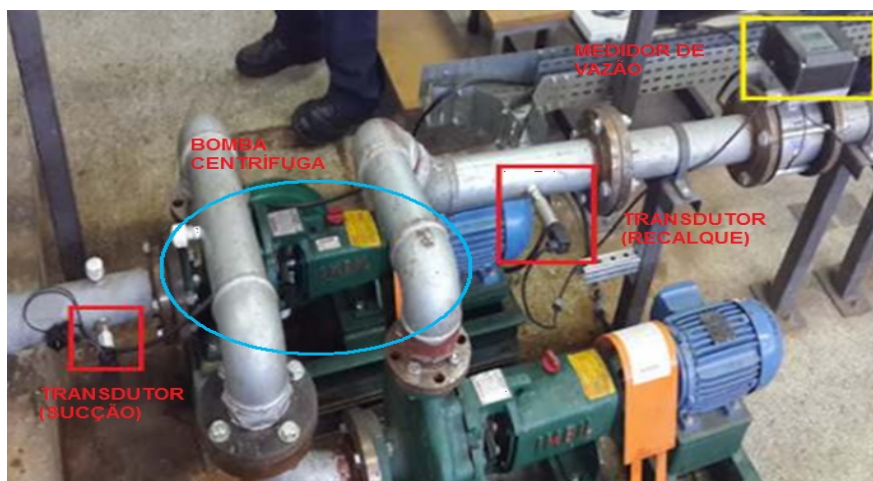


Figura 1 – Fotografia das instalações do sistema utilizado para o estudo.

Na sequência, os ensaios foram realizados variando o percentual de frequência de funcionamento do motor. Para cada faixa de frequência, foram realizados ensaios para a condição com indução de cavitação e sem indução de cavitação. Dessa forma, os ensaios foram realizados desde a frequência de 100% até 50%, com medições a cada 5%. A Tabela 1 apresenta a equivalência entre os diferentes percentuais de frequência avaliados e as respectivas rotações do motor, as quais foram mensuradas com o auxílio de um tacômetro. Cumpre destacar que a redução no percentual da frequência diminui a rotação do motor, ocasionando a modificação das curvas características da bomba, principalmente a curva do *Net Positive Suction Head* disponível ($NPSH_d$).

Tabela 01 – Equivalência entre o percentual de frequência e a rotação do motor.

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

Desenvolvidos os ensaios, a partir das grandezas mensuradas com o auxílio dos equipamentos foi possível estimar diversas variáveis pertinentes ao estudo como a Pressão Absoluta (P_{abs}), a Altura Total de Elevação (H), o Índice de Cavitação Incipiente ou Sigma Crítico (σ_c), o Número de Thoma (σ), o ($NPSH_d$), a Rotação Específica (N_q), o *Net Positive Suction Head* requerido ($NPSH_r$), a Potência Hídrica (PH) e o Rendimento do conjunto motobomba (η), cujas equações serão apresentadas a seguir.

1. Critério para definição de $NPSH_r$

Para os casos em que não se dispõe de informações de catálogo do fabricante, pode-se adotar um critério para a estimativa de $NPSH_r$. Segundo o gráfico construído por Yedidiah (1996) e apresentado na Figura 2, pode-se conseguir uma boa aproximação por meio da seguinte equação.

$$NPSH_r = 0,67 \times Q_n^{0,424} \quad (1)$$

Q_n – Vazão Nominal em m^3/h

O gráfico de Yedidiah (1996) apresentado na Figura 2 foi elaborado por meio de teste em diversas bombas centrífugas, com marcas variadas, porém com rotação constante de 3500 rpm.

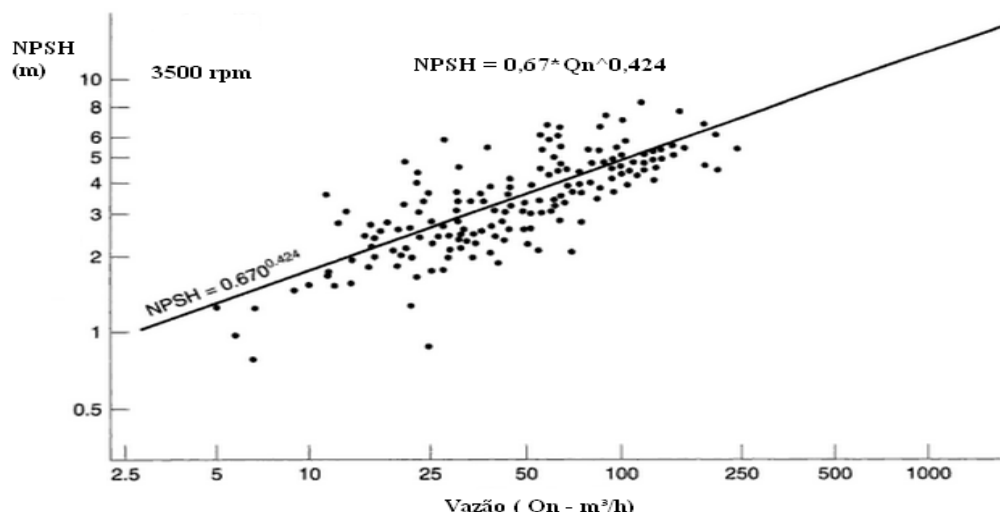


Figura 2 – Gráfico para estimativa de NPSH_r de Yedidiah (1996) – Adaptado

Por meio da equação apresentada obteve-se o valor de NPSH_r = 1,78 m, para as condições nominais de operação do conjunto motobomba.

2. Variação do NPSH_r com a rotação do conjunto motobomba

O NPSH_r fornecido pelos fabricantes, refere-se ao funcionamento pleno do conjunto motobomba, ou seja 100% de sua frequência de rotação. Entretanto, com a variação desta frequência de rotação do conjunto este parâmetro tende a sofrer uma redução.

Uma breve análise foi construída a partir das curvas características do catálogo de uma marca conhecida no mercado. Escolheram-se três bombas com rotações distintas, porém fixando-se os diâmetros do rotor e a vazão de operação, analisando dessa forma somente o comportamento do NPSH_r. A Tabela 2 apresenta os valores de NPSH_r obtidos para bombas com rotação de 1160 rpm, 1750 rpm e 3500 rpm funcionando a uma vazão de 20 m³/h..

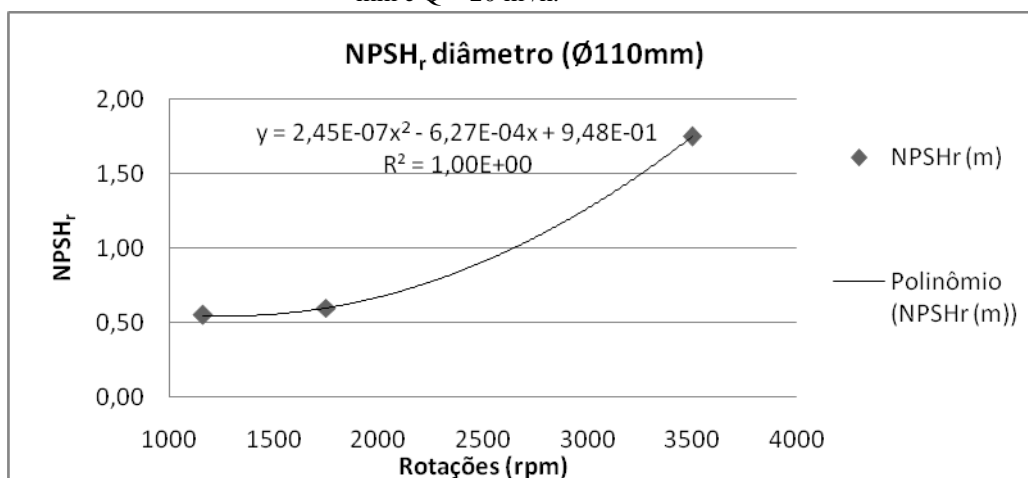
Tabela 2 – NPSH_r para bombas com rotação 1160 rpm, 1750 rpm, 3500 rpm, Ø 110 mm e Q = 20m³/h.

Modelo	Rotação (rpm)	Diâmetro do Rotor (mm)	Vazão (m³/h)	Altura (m)	NPSH _r (m)
MegaCPK 065-040-125 n=1160 rpm	1160	110	20,00	0,75	0,55
MegaCPK 065-040-125 n=1750 rpm	1750	110	20,00	4,50	0,60
MegaCPK 065-040-125 n=3500 rpm	3500	110	20,00	20,50	1,75

A partir dos dados apresentados na Tabela 2, construiu-se o gráfico apresentado na Figura 3.

A partir desta análise, observa-se que para operação utilizando-se rotações mais baixas a necessidade de energia em sua sucção é menor, ou seja, o NPSH_r necessário para a operação do conjunto será menor.

Figura 3 – Gráfico de NPSH_r para bombas com rotação 1160 rpm, 1750 rpm, 3500 rpm, Ø 110 mm e Q = 20 m³/h.



Como informado anteriormente, os ensaios procederam com a variação de rotação do conjunto motobomba. Para a avaliação da variação do NPSH_r conjuntamente à variação da rotação, segundo Silva (2002) esta dificuldade pode ser sanada utilizando uma relação de semelhança entre pontos homólogos, apresentada a seguir.

$$NPSH_{n1} = NPSH_{nn} \times \left(\frac{n1}{n}\right)^2 \quad (2)$$

n – rotação total

n₁ – rotação para a frequência analisada

Então estimou-se o NPSH_r para todas as faixas de frequência analisadas neste estudo. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos por este método.

Tabela 3 – Estimativa de NPSH_r com a variação da rotação.

Frequência (%)	Vazão (m ³ /h)	Rotação (rpm)	Estimativa de NPSH _r (mca)
100	10,00	3480	2,00
95	10,00	3313	1,79
90	10,00	3168	1,64
85	10,00	3015	1,48
80	10,00	2852	1,33
75	10,00	2688	1,18
70	10,00	2518	1,04
65	10,00	2339	0,89
60	10,00	2167	0,77
55	10,00	1998	0,65
50	10,00	1805	0,53

3. Definições de Sigma Crítico (σ_c)

O índice Sigma Crítico, segundo Porto (1999) representa o valor ao qual a cavitação é incipiente. Vários autores formularam equações para representá-lo, sendo alguns deles Escher Wyss (1956), Hydraulic Institute (1969), Macintyre (1982), Porto (1999), Stepanoff (1961), Widdern (1936) e Wislicenus (1956). As quais apresentam-se descritas abaixo.

Escher Wyss $\sigma_c = 0,001224 \times N_g^{4/3}$ (3)

Hydraulic Institute $\sigma_c = 0,01152 \times N_g^{4/3}$ (4)

Macintyre $\sigma_c = 0,0011 \times N_g^{4/3}$ (5)

Porto $\sigma_c = 0,0002 \times N_g^{4/3}$ (6)

Stepanoff $\sigma_c = 0,00121 \times N_g^{4/3}$ (7)

Widdern $\sigma_c = 0,001202 \times N_g^{4/3}$ (8)

Wislicenus $\sigma_c = 0,00103 \times N_g^{4/3}$ (9)

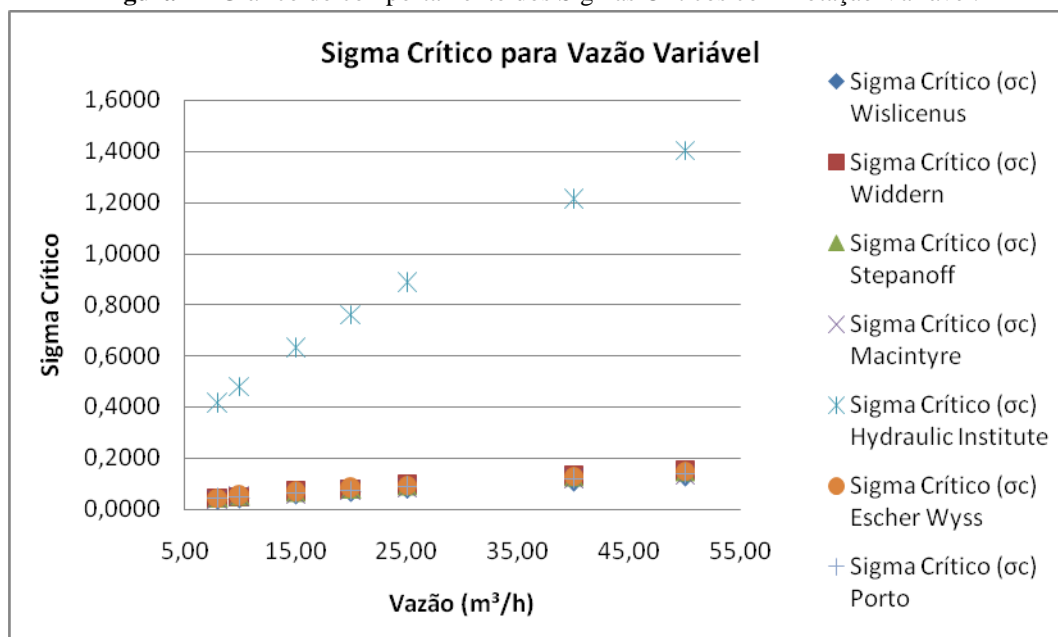
A partir destas equações elaborou-se um quadro comparativo ao qual a vazão e altura foram mantidas constantes, 10 m³/h e 25 mca consecutivamente, variando apenas a rotação. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4 – Comparação entre os Sigmas Críticos para Rotação Variável

Freq. De Rotação (%)	Velocidade Específica (Nq)	(σ_c) Escher Wyss	(σ_c) Hydraulic Institute	(σ_c) Macintyre	(σ_c) Porto	(σ_c) Stepanoff	(σ_c) Widdern	(σ_c) Wislicenus
100	16,40	0,0510	0,4802	0,0459	0,0469	0,0504	0,0501	0,0429
95	15,62	0,0478	0,4497	0,0429	0,0439	0,0472	0,0469	0,0402
90	14,93	0,0450	0,4237	0,0405	0,0413	0,0445	0,0442	0,0379
85	14,21	0,0421	0,3966	0,0379	0,0387	0,0417	0,0414	0,0355
80	13,44	0,0391	0,3683	0,0352	0,0359	0,0387	0,0384	0,0329
75	12,67	0,0362	0,3403	0,0325	0,0332	0,0357	0,0355	0,0304
70	11,87	0,0331	0,3119	0,0298	0,0304	0,0328	0,0325	0,0279
65	11,03	0,0300	0,2827	0,0270	0,0276	0,0297	0,0295	0,0253
60	10,22	0,0271	0,2553	0,0244	0,0249	0,0268	0,0266	0,0228
55	9,42	0,0243	0,2291	0,0219	0,0224	0,0241	0,0239	0,0205
50	8,51	0,0213	0,2001	0,0191	0,0195	0,0210	0,0209	0,0179

Com os resultados obtidos apresentados na Tabela 4, construiu-se o gráfico apresentado na Figura 4 para melhor observação do comportamento dos Sigmas Críticos analisados com a variação de rotação.

Figura 4 - Gráfico do comportamento dos Sigmas Críticos com Rotação Variável.



Por meio da Figura 4 observa-se que a equação proposta pelo Hydraulic Institute apresenta os resultados mais conservadores, no entanto são resultados muito discrepantes quanto às demais equações. Portanto adotou-se a equação de Macintyre para esta verificação.

4. Verificações do Número de Thoma

A equação utilizada para o cálculo do Número de Thoma é a seguinte:

$$\sigma = \frac{NPSH_d}{H} \quad (10)$$

H – altura total de elevação (m)

Para os dados obtidos em laboratório, aplicou-se a equação para energia disponível e a sua correspondente altura total de elevação.

5. NPSH_d (Net Positive Suction Head disponível)

Para a estimativa do NPSH_d dos ensaios de laboratório utilizou-se a seguinte equação:

$$NPSH_d = P_a + \left(P_{sucção} + \frac{V^2}{2g} \right) \quad (11)$$

P_a – pressão atmosférica

P_{sucção} – pressão relativa medida pelo transdutor no ponto de interesse

V – velocidade do escoamento

g – aceleração da gravidade

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

6. Altura Total de Elevação (H)

As pressões relativas de sucção e recalque medidas pelos transdutores foram transformadas em pressões absolutas utilizando a seguinte equação:

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm} \quad (12)$$

sendo P_{man} é a pressão manométrica e P_{atm} é a pressão atmosférica para a cidade de Curitiba (9,34 mca).

Por sua vez, a altura total de elevação (H) foi estimada por:

$$H = P_{sucção} + (P_{recalque} + z_2) \quad (13)$$

sendo $P_{sucção}$ a pressão absoluta de sucção (mca), $P_{recalque}$ é a pressão absoluta de recalque (mca) e z_2 a cota do plano de referência (eixo da bomba) ao transdutor de recalque.

7. Parâmetros de Verificação da Cavitação

Neste estudo utilizaram-se duas comparações para conferir a ocorrência do fenômeno. Portanto, quando o $NPSH_d$ for menor que o $NPSH_r$ ($NPSH_d < NPSH_r$) ou segundo Porto (1999) quando $\sigma < \sigma_c$ poderá ocorrer cavitação no sistema.

8. Análise das Potências Hídrica e Elétrica

Com relação à Potência Hídrica (PH) fornecida ao sistema, foi calculada pela seguinte equação:

$$PH = \gamma QH \quad (14)$$

Sendo que γ é o peso específico da água (9793,3 N/m³).

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

$$\eta = \frac{PH}{Pot_e} \quad (15)$$

sendo Pot_e é a potência elétrica, a qual foi mensurada durante os ensaios para os intervalos analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Após a aplicação da metodologia a todas as faixas para ambas as condições (Situação Normal e Situação de indução de Cavitação), calculou-se o desvio padrão para o parâmetro com maior variabilidade, neste caso, a altura total de elevação. A partir da média obtida para este parâmetro, adotou-se como critério o valor de \pm duas vezes o desvio padrão a partir do valor da média. Dentre os resultados obtidos excluíram-se aqueles não incluídos neste intervalo. Para o critério de cavitação, utilizaram-se as duas comparações anteriormente apresentadas. No entanto, o critério de $NPSH_d < NPSH_r$ apresentou um número maior de dados em situação de cavitação, sendo assim, o método adotado.

Em decorrência, obteve-se a Tabela 5 a qual apresenta os valores médios para cada percentual de frequência do motor operando em condições normais, ou seja, sem indução de cavitação.

Tabela 5 – Dados médios obtidos para diferentes rotações sem indução de cavitação.

Situação Normal							
Frequência (%)	Nº de dados	Média Vazão (m3/h)	Média Altura de Elevação (mca)	NPSHd Média (mca)	NPSHr Média (mca)	Número de Cavitação-Thoma Média (σ)	Limite de Início de Cavitação-Sigma Crítico (σ_c)
100	192	10,41	52,39	9,53	1,81	0,182	0,022
95	117	9,85	49,98	9,54	1,77	0,191	0,021
90	138	10,39	44,80	9,54	1,81	0,213	0,023
85	93	9,80	42,65	9,54	1,76	0,224	0,022
80	139	10,24	38,17	9,49	1,80	0,249	0,023
75	131	9,63	36,00	9,49	1,75	0,264	0,022
70	84	10,46	29,67	9,54	1,81	0,322	0,026
65	107	9,93	28,56	9,54	1,77	0,334	0,024
60	104	10,09	24,97	9,55	1,78	0,383	0,025
55	120	9,03	24,88	9,54	1,70	0,383	0,021
50	120	9,08	22,69	9,55	1,71	0,421	0,020

Observa-se que os valores apresentados na coluna σ mantiveram-se para todas as faixas de estudo, acima dos valores obtidos para o σ_c , confirmando que não houve cavitação, bem como os valores de NPSH_d que também mantiveram-se acima do NPSH_r. Com os resultados apresentados nesta tabela, construiu-se o gráfico da Figura 5.

Assim, a relação apresentada na Figura 5 entre a frequência e o n° de Thoma demonstra que os valores correspondentes para cada faixa de rotação do parâmetro Thoma, distanciaram-se do zero absoluto com a redução da frequência de rotação, verificando assim uma menor tendência à cavitação.

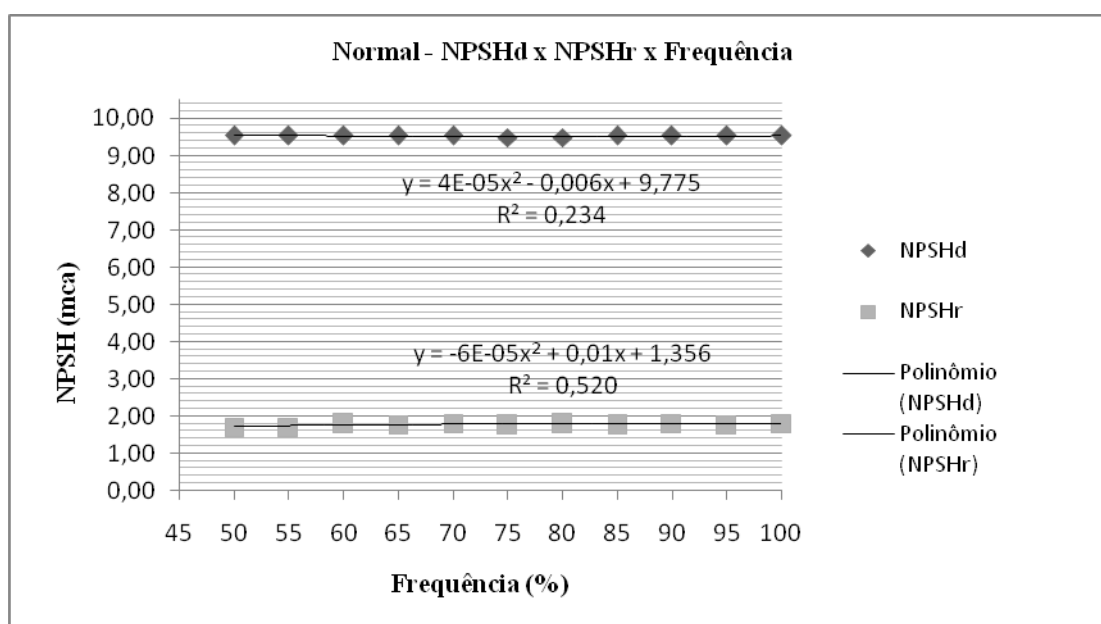


Figura 5 – Situação Normal, NPSH_d x NPSH_r x Frequência.

A Tabela 6 por sua vez, apresenta os resultados médios obtidos para a situação de indução da cavitação.

Tabela 6 – Dados médios obtidos para diferentes rotações com indução da cavitação.

Situação de Cavitação							
Frequência (%)	Nº de dados	Média Vazão (m³/h)	Média Altura de Elevação (mca)	NPSHd Média (mca)	NPSHr Catálogo (mca)	Número de Cavitação-Thoma Média (σ)	Limite de Início de Cavitação-Sigma Crítico (σ_c)
100	31	5,40	24,99	0,90	1,81	0,037	0,030
95	25	7,64	21,57	0,95	1,77	0,046	0,042
90	21	5,51	23,24	1,06	1,81	0,047	0,030
85	16	7,93	20,90	1,07	1,76	0,053	0,039
80	29	7,25	16,28	0,92	1,80	0,058	0,043
75	25	6,32	15,45	1,04	1,75	0,068	0,038
70	9	7,63	15,72	1,20	1,81	0,077	0,039
65	5	6,26	17,57	1,13	1,77	0,064	0,027
60	11	9,80	14,47	1,15	1,78	0,079	0,042
55	4	6,95	14,34	1,20	1,70	0,084	0,030
50	4	6,95	14,34	1,20	1,71	0,084	0,026

Observa-se que a média dos valores de σ não ficaram abaixo dos valores obtidos para o σ_c , devido a grande parte dos dados analisados verificarem ao critério de NPSH_r, porém resultou em uma maior proximidade deste parâmetro ao σ_c , do que comparado aos dados da Tabela 5. Com a indução de perda de carga ao sistema 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. Com os resultados apresentados na Tabela 6, construiu-se o gráfico da Figura 6.

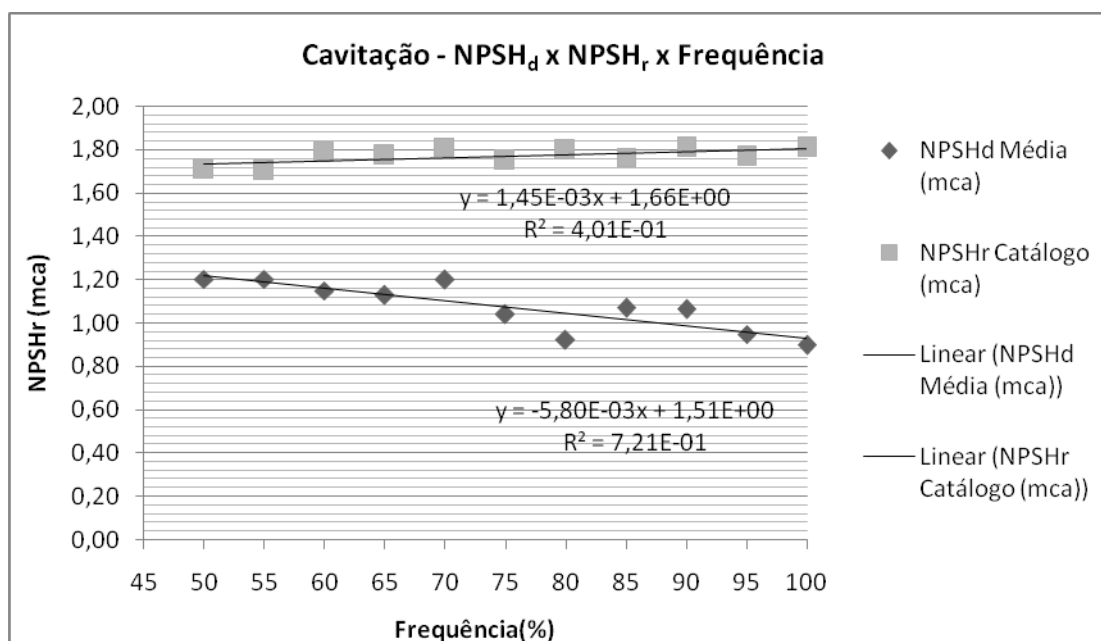


Figura 6 – Situação de Cavitação, relação entre NPSH's e Frequência.

Observa-se que a indução da cavitação ao sistema altera significativamente os parâmetros de NPSH. A reta de $NPSH_r$ desenvolveu-se sempre abaixo da reta de $NPSH_d$, indicando desta forma a ocorrência de cavitação. O parâmetro de $NPSH_d$ não apresentou uma significativa variação, porém obteve-se uma leve queda a qual afirma a tendência apresentada na Figura 3.

Por fim, a Tabela 7 apresenta os resultados obtidos com os cálculos de potências e rendimento do conjunto motobomba na presença e na ausência de cavitação.

Tabela 7 – Resultados dos cálculos de potências e rendimento para a Situação Normal e com Cavitação.

Freq. (%)	Situação Normal				Situação Cavitação				$\Delta\eta$
	Nº de dados	Potência Elétrica Média (W)	Potência Hídrica Média (W)	Rendim. Normal (η)	Nº de dados	Potência Elétrica Média (W)	Potência Hídrica Média (W)	Rendim. Cavitação (η)	
100	192	3509,8	1493,4	42,5%	31	1941,8	366,8	18,9%	23,7%
95	117	2949,4	1339,8	45,4%	25	1812,4	448,1	24,7%	20,7%
90	138	2687,5	1266,4	47,1%	21	1805,4	348,1	19,3%	27,8%
85	93	2332,0	1136,8	48,7%	16	1405,3	450,8	32,1%	16,7%
80	139	2244,1	1062,4	47,3%	29	1439,5	321,1	22,3%	25,0%
75	131	2055,1	942,4	45,9%	25	1364,6	265,7	19,5%	26,4%
70	84	1854,3	844,9	45,6%	9	1364,6	326,4	23,9%	21,6%
65	107	1588,3	771,6	48,6%	5	1247,3	299,2	24,0%	24,6%
60	104	1444,5	690,7	47,8%	11	1004,0	385,8	38,4%	9,4%
55	120	1191,0	611,8	51,4%	4	866,0	271,0	31,3%	20,1%
50	120	1039,6	560,7	53,9%	4	778,0	271,0	34,8%	19,1%

Observando a Tabela 7 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. É possível salientar que para a condição normal, obtiveram-se valores relativamente altos para o rendimento do conjunto, acredita-se que devido à vazão manter-se próxima a vazão nominal, ainda que a rotação do motor estivesse abaixo da frequência nominal (100%), tenha influenciado este parâmetro. Comparando-se os resultados obtidos entre a mesma faixa de frequência para ambas as situações, obteve-se a maior queda do rendimento para a faixa de 90%, em que houve redução de 27,8%.

Com os resultados apresentados na Tabela 7 foi construído o gráfico apresentado na Figura 7, relacionando o rendimento do conjunto motobomba na ocorrência e na ausência da cavitação.

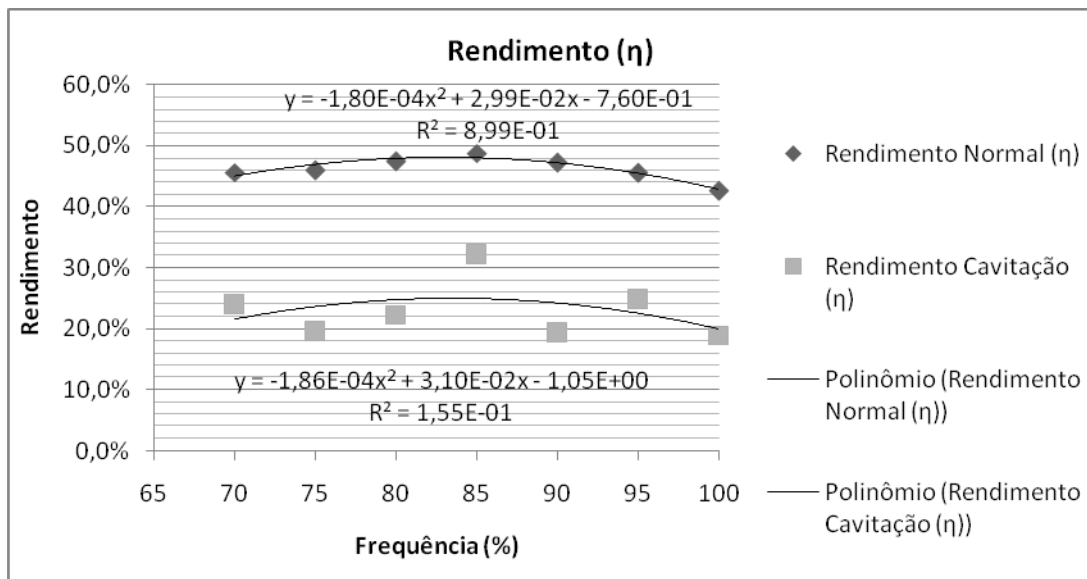


Figura 7 – Comportamento do rendimento do conjunto motobomba na presença e na ausência de cavitação.

Observa-se de modo geral uma significativa queda no rendimento do conjunto motobomba na presença de cavitação, representando no cálculo do $\Delta\eta$ médio uma redução de 21,4% na eficiência do conjunto.

CONCLUSÕES

Conforme os resultados apresentados para o cálculo de σ pode-se concluir que o conjunto motobomba operando com a imposição de baixa rotação resultou em um maior distanciamento do parâmetro σ em relação ao zero do Número de Thoma. Sendo assim, conclui-se que o fenômeno de cavitação torna-se menos intenso conforme é reduzida a rotação do motor para as condições de operação apresentadas.

A análise dos parâmetros elétricos apresentou uma acentuada queda no rendimento geral, o valor médio da redução do rendimento do conjunto representou um valor de 21,4% na presença de cavitação.

A comparação entre NPSH's mostrou-se mais eficaz quanto ao diagnóstico de cavitação, a comparação entre Sigmas mostrou-se menos conservadora, podendo diagnosticar falsos positivos.

Caso haja necessidade em Estações de Tratamento de Água de reduções na vazão aduzida ou recalçada, devido a questões de demanda, sugere-se a utilização de equipamentos, tais como inversores de frequência para esta redução. Caso essa redução seja realizada por manobras 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.

Portanto, a cavitação não é somente um fenômeno dispendioso quanto à questão de manutenção mecânica, como também, proporciona impactos significativos no consumo de energia elétrica do conjunto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRENNEN, C. E., Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, 1995.
2. 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.
3. ESCALER, X., Egusquiza, E., Farhat, M., Avellan, F., Coussirat, M., Detection of cavitation in Hydraulic Turbines. Mechanical Systems and Signal Processing 20, 2006.

4. FALVEY, H.T., *Cavitation in Chutes and Spillways*, UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, Bureau of Reclamation, 1990.
5. FILHO, J.G.D., *Equipamento para Simulação da Erosão por Cavitação*, RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 11 n.1 Jan/Mar 2006, 51-62.
6. GILES, R.V., Evett, J.B, Liu, C. *Mecânica de Fluidos e Hidráulica/ 2ª edição/Schaum*. Mcgraw-Hill, 1996
7. GOMES, H.P., *Sistemas de Bombeamento Eficiência Energética*, Editora Universitária- UFPB, 2009.
8. PORTO, R.M., *Hidráulica Básica/2ª edição/ São Carlos: EESC*, 1999
9. 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. n.2, 2002.
10. SOARES, H., *Variação na Curva do Sistema*, UFJF-Universidade Federal de Juiz de Fora, cap.5, 2012.
11. YEDIDIAH, S. , *Centrifugal Pump User's Guidebook Problems and Solutions*, Chapman & Hall, 1996.
12. WORLD PUMPS, *Centrifugal Pumps: avoiding cavitation*, July/August/2011, pg.35