
ANÁLISE DE RENDIMENTO E RUÍDO DE BOMBA CENTRÍFUGA OPERANDO COM CAVITAÇÃO INCIPIENTE, REDUZIDA, MODERADA E DESENVOLVIDA

Francisco Carlos Schroder, UNICAMP, francisco.schroder@yahoo.com.br

Resumo: *O rendimento de uma bomba centrífuga depende do projeto mecânico de seus componentes bem como das condições hidrodinâmicas da instalação. Quando operando fora da faixa a qual foi projetada ou com condições desfavoráveis de sucção geradas por perdas de carga excessivas, alta temperatura do líquido, nível de aspiração insuficiente, tem seu rendimento reduzido e ruídos hidrodinâmicos adicionais. Alguns destes fatores ou a combinação destes podem originar uma operação com cavitação. A cavitação é um fenômeno relativamente comum em sistemas de bombeamento de água que requer diagnóstico para sua caracterização e respectivas ações corretivas. Este trabalho correlaciona duas medições físicas de um sistema, rendimento e ruído gerado pela bomba operando com cavitação em diferentes níveis, para uso como ferramenta de diagnose. A classificação da operação com a cavitação leva a diferentes ações corretivas que devem ser adotadas para evitar danos materiais, perdas de produção ou mesmo riscos humanos decorrentes desta operação. As medições, cálculos e comparações do comportamento do rendimento e ruídos no experimento permitem uma criteriosa análise e respectivas recomendações das intervenções a serem tomadas.*

Palavras-chave: Cavitação, bombas centrífugas, rendimento, ruídos, diagnóstico.

ANÁLISE DE RENDIMENTO E RUÍDO DE BOMBA CENTRÍFUGA OPERANDO COM CAVITAÇÃO INCIPIENTE, REDUZIDA, MODERADA E DESENVOLVIDA

Abstract: *The performance of a centrifugal pump depends on the mechanical design of components and the hydrodynamic boundary conditions. When operating out of range which is designed or unfavorable conditions suction generate by excess discharge, high temperature of the liquid, insufficient aspiration level, has reduced his income and additional hydrodynamic noises. Some of these factors or a combination thereof may cause cavitation in one operation. Cavitation is a relatively common phenomenon in water pumping systems that requires diagnosis for the characterization and their corrective actions. This work correlates two physical measurements of a system, performance and noise generated by the pump operating with cavitation at different levels, for use as a diagnosis tool. The classification of the operation with cavitation leads to different corrective actions that must be taken to prevent property damage, loss of production or even human risks resulting from this operation.. Measurements, calculations and performance comparison and noise in the experiment allow a thorough analysis and their recommendation of interventions to be taken.*

Keywords: Cavitation, centrifugal pumps, performance, noise, experimental analysis, diagnosis.

1. INTRODUÇÃO

Bombas centrífugas são equipamentos rotativos de intensivo uso nos segmentos industriais e de utilidade. O bombeamento de água para fins industriais e de consumo representam os sistemas mais utilizados com cerca de 75% das aplicações conforme relatório Mercado Mundial de Bombas . A cavitação é um fenômeno que pode ocorrer em bombas centrífugas quando as condições de sucção são insatisfatórias e podem causar prejuízos operacionais significativos. A otimização da manutenção de bombas nestes casos, requerem ações corretivas que podem ser obtidas por ferramentas de diagnose como análise de erosão , ruídos, vibração entre outras técnicas. O resultado de tais procedimentos pode significar economia de mão de obra, de materiais e redução de perdas de produção, ao recomendar a intervenção no equipamento no momento correto, antes de avarias ou acidentes graves.

Este trabalho visa contribuir como recurso de diagnose da cavitação, classificando-a conforme sua intensidade com base no rendimento hidráulico e nível de ruído do conjunto moto bomba, oferecendo uma oportunidade de ação corretiva para evitar os riscos inerentes a esta condição. O objetivo é estabelecer valores práticos da queda de rendimento e do aumento do nível de ruído simultaneamente, para melhorar a confiabilidade no conhecimento do grau do fenômeno, a partir de comparações do comportamento de ambos os efeitos.

Ao contrário de outros ensaios já realizados que reproduzem os efeitos da bomba operando normalmente com cavitação incipiente ou em níveis iniciais, neste trabalho é analisada a cavitação em níveis mais severos do fenômeno. A montagem de um experimento robusto com uma configuração com tubulações e conexões em aço de 0,15 m de diâmetro e conjunto moto bomba de médio porte proporcionaram bons resultados comparativos com estes níveis.

2. CAVITAÇÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS

A cavitação ocorre quando o líquido, à temperatura constante tem sua pressão reduzida à pressão de vapor. Nesta condição, na existência de núcleos gasosos, formam-se cavidades ou bolhas de vapor, origem do termo cavitação. Se a pressão circundante aumentar acima da pressão de vapor, as bolhas implodirão de forma violenta causando ruídos e vibrações conforme TULLIS (1982). A cavitação pode surgir, por exemplo, na sucção da bomba, limitando sua capacidade de aspiração e causando efeitos indesejáveis no funcionamento, como erosão do rotor, queda no rendimento hidráulico, além de ruídos e vibrações.

Para a caracterização da cavitação em bombas são utilizadas grandezas específicas, acompanhadas de medições de níveis de ruídos, vibrações, erosão do rotor e quando possível observada a quantidade de bolhas formadas durante a ocorrência do fenômeno. Um termo que determina as boas condições de aspiração da bomba é o NPSH (Net Positive Suction Head), criado para sistemas de bombeamento e apresentado, ou em relação à instalação, denominado disponível (NPSH_d), ou em relação à bomba, denominado requerido (NPSH_r).

Para cálculos dos parâmetros do experimento e determinação do NPSH, utilizaram-se as equações (1) a (4) :

Altura manométrica total:

$$H = H_r - H_s \quad (1)$$

Altura manométrica de recalque:

$$H_r = \frac{Pfr}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Altura manométrica de sucção:

$$H_s = \frac{P_f s}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Rendimento do conjunto moto bomba:

$$\eta = \gamma * \frac{Q * H}{3,67 * P_c} \quad (4)$$

O $NPSH_d$ corresponde a energia disponível para conduzir o líquido através da tubulação de sucção até o flange da voluta da bomba, conforme STEPANOFF (1957), e expresso pela equação 5.

$$NPSH_d = \frac{P_a - P_v}{\gamma} \pm H_s \quad (5)$$

O $NPSH_r$ por sua vez, representa a energia do líquido na sucção da bomba acima da pressão de vapor, necessária para a aspiração, e depende do projeto da bomba, do diâmetro do rotor e da velocidade específica, sendo fornecido pelo fabricante mediante ensaios.

Este ensaio padronizado pela ANSI/HI 1.6-2000 (American National Standard for Centrifugal Pump Tests e Hydraulic Institute), consiste de um circuito com a bomba instalada e submetida à redução das condições de aspiração ou $NPSH_d$, mantendo-se a vazão constante.

A redução gradual do $NPSH_d$ até o surgimento da cavitação corresponde a uma queda de 3% na pressão da bomba e a geração de bolhas e ruídos típicos do fenômeno que servem de referência para a conceituação de cavitação incipiente.

O índice ou fator de cavitação de Thoma (σ_t) equação 6, é um adimensional que descreve a capacidade de sucção de bombas e matematicamente é expresso como a relação entre o $NPSH_d$ e altura total manométrica total H, conforme YEDIDIAH (1996). O uso deste fator requer observação quando da redução de diâmetro do rotor da bomba, onde o resultado do quociente não significa necessariamente variações da capacidade de sucção.

O fator de Thoma estabelece a relação existente entre a intensidade de forças que se opõem à formação da cavitação e as que a favorecem, ou de outro modo, caracteriza a capacidade de sucção de uma máquina de fluxo conforme PFLEIDERER (1979), equação 6:

$$\sigma_t = \frac{NPSH_d}{H} \quad (6)$$

Os níveis de intensidade da cavitação em geral, somente podem ser determinados através de experimentos em regimes específicos, o que gera dificuldade em padronizar uma classificação. Propostas como a de TOMAS (1986), traduzem o grau da cavitação por cinco designações:

- Cavitação incipiente determinada pelas condições padronizadas de teste;
- Cavitação reduzida que exprime as primeiras manifestações do fenômeno;
- Cavitação moderada correspondente ao limiar das condições estáveis do escoamento;
- Cavitação desenvolvida onde se observam os níveis máximos de ruídos e vibrações obtidos em altas frequências;
- Cavitação fortemente desenvolvida representando uma fase posterior à máxima intensidade, contudo, com contraditória redução dos níveis de ruídos e vibrações.

Outras denominações empregadas por pesquisadores como KNAPP (1970), BOUZIAD (2006) podem ser correlacionadas a classificação de TOMAS (1986): considerando a cavitação crítica como reduzida e a cavitação com danos incipientes, como moderada.

TULLIS, (1982) emprega também uma classificação para níveis mais severos, em que a cavitação desenvolvida é similar a intensa e a cavitação fortemente desenvolvida é denominada supercavitação.

Neste trabalho, o nível de cavitação fortemente desenvolvida não foi reproduzido, evitando riscos inerentes, tanto materiais como humanos, durante a operação da bomba.

Os efeitos sobre o rendimento e ruídos em bombas foram pesquisados em vários experimentos, notadamente para a cavitação incipiente. STUPARU et al (2010) mostraram a queda de rendimento da curva de uma bomba em função do índice de cavitação e do aumento do volume de vapor dentro da área do rotor quando da cavitação incipiente, estabelecendo correlação de acordo com autores.

Os ensaios com sinais acústicos gerados pelo fenômeno da cavitação como os de ALFAYES (2005), GULICH (2007), CUDINA e PREZELJ (2009), THOBIANI et al (2010), mostraram bons resultados relacionando o fenômeno com a intensidade do sinal de ruídos, com operação da bomba com cavitação incipiente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento (figura 1) montado no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, designado por LHMF, é constituído por um circuito de água com tubo de aço carbono diâmetro 0,150 m, com alimentação por um reservatório inferior, conjunto moto bomba de recalque, tanque superior com 8,4 m³ de volume, com tranquilizador de turbulência, régua de nível, tomada de água para a bomba principal com grade, tubulação de sucção e recalque de diâmetro 0,150 m. com válvulas de controle tipo gaveta sifão de descarga com retorno para o reservatório inferior.

Acionamento elétrico do conjunto por rede trifásica, painel de comando e proteção, inversor de frequência e motor elétrico de 22,0 Kw; A bomba centrífuga empregada foi do tipo radial horizontal, mono estágio, tipo base luva com rotor semi aberto de 0, 264 m de diâmetro, flange de sucção de 0,150 m e recalque 0,125 m.



Figura 1– Conjunto moto bomba com decibêlfmetro e analisador de energia

Para a obtenção dos parâmetros rendimento e ruído, foram acoplados os seguintes instrumentos selecionados de forma a permitir reprodutibilidade em campo das medições conforme tabela (1):

Tabela 1 – Instrumentos de medições do experimento

Instrumento	Marca	Faixa de operação	Precisão
transdutor de pressão sucção	Smart	de -250 a + 250 kPa	0,2%
transdutor de pressão recalque	Jumo	de -250 a + 2500 kPa	0,1%
Medidor de vazão eletromagnético	Emerson	de 0 a 18 m/s	0,3%
Analizador de energia	InstruTerm	5 a 10 ⁴ kW	1,0%
Decibelímetro	Minipa	30 a 130 dB	1,0 dB
Oxímetro	Alfakit	de 0 a 19,9 mg/l	2,0%
Termômetro digital	Soma	de -25 a + 60 °C	0,1 °C
Termômetro de mercúrio	BD	de 0 a 40 °C	0,5 °C
Barômetro anelóide	Fischer	de 76 a 105 kPa	1,0%

Os transdutores de pressão realizaram as medições a montante e a jusante do conjunto motobomba; o medidor eletromagnético de vazão instalado a jusante da válvula de controle de recalque conforme recomendações do Hydraulic Institute (HI), tomou as seis vazões principais relativas à caracterização da cavitação; o analisador de energia acoplado à saída do inversor de frequência proporcionou a medição da potência consumida nos pontos de operação requeridos; o decibelímetro foi instalado em um pedestal com 0,700 m de altura da base com o microfone a cerca de 0,100 m da voluta da bomba; o oxímetro realizou duas medições da quantidade de ar dissolvido no reservatório superior durante os ensaios; o termômetro digital foi instalado com o sensor no reservatório superior para realização das medidas de temperatura da água e consequente determinação da pressão de vapor e o barômetro anelóide proporcionou as medições da pressão atmosférica para cálculo do NPSH.

O trabalho foi realizado em duas etapas. A etapa 1 consistiu da determinação do NPSH_r e a etapa 2 constituiu da caracterização dos níveis mais severos de operação da bomba com cavitação.

Nas duas etapas foram consideradas seis vazões distintas, de 0,0586, 0,0619, 0,0653, 0,0686, 0,0719 e 0,0753 m³/s e foram medidas a pressão de sucção (P_{fs}), a pressão de recalque (P_{fr}), a potência consumida (P_c), o nível de ruído e calculado o NPSH_d, ΔNPSH, H, ΔH, σ_t e Rendimento.

As seis vazões escolhidas correspondem de 90 a 115% do ponto de melhor eficiência da bomba, representativas da faixa de ocorrência da cavitação. As condições simuladas para cavitação foram obtidas pela redução de pressão por fechamento da válvula de controle instalada a montante da bomba.

3.1. PRIMEIRA ETAPA - Determinação do NPSH_r

Nesta etapa foi determinado o NPSH_r com o funcionamento da bomba para cada vazão fixa e redução de pressão através do estrangulamento da válvula de controle de sucção até uma queda de 3% na altura manométrica total H, conforme determina o HI no Centrifugal Pump Tests (2000). O NPSH_r obtido no catálogo do fabricante serviu apenas como referência para início do ensaio, sendo o valor real adotado após a igualdade com o NPSH_d quando da queda do rendimento padronizado. O aparecimento da cavitação incipiente é base para a estimativa de níveis mais severos na etapa seguinte.

O roteiro sumarizado desta etapa consiste de conferência do nível da água do reservatório superior através da régua instalada; abertura total da válvula de controle de sucção; procedimento de escorva da bomba, acionamento da bomba pelo inversor de frequência com rampa de aceleração até a velocidade de 1740 rpm; abertura da válvula de controle de recalque até a vazão determinada; medições da Pfs, Pfr, Q, ruído, Pc, Pa, temperatura da água ; redução de pressão na sucção pelo fechamento da válvula de controle em aproximadamente 5 kPa a cada ajuste; conferência da vazão no medidor eletromagnético de vazão após estabilização do fluxo e repetição dos procedimentos até a queda correspondente a variação de 3% na altura manométrica total, considerada em relação a medição em condições normais de funcionamento da bomba.

3.2. SEGUNDA ETAPA – Caracterização dos níveis de cavitação

Este ensaio caracteriza as condições denominadas como cavitação reduzida, moderada e desenvolvida, através de um estrangulamento maior da válvula de controle na sucção para uma redução maior da pressão, correspondente ao aparecimento do fenômeno em grau mais intenso. Diferente do ensaio de $NPSH_r$ já padronizado para a caracterização da cavitação incipiente, baseado na queda da carga H de 3% em relação à operação normal, as demais classificações requerem a observação e acompanhamento de outras variáveis que possam determinar a mudança de patamar da intensidade do fenômeno. Nesta etapa a principal ferramenta foi a correlação dos fatores obtidos por grandezas medidas e calculadas para diferentes vazões que permitiram uma classificação a partir das variações destas grandezas, surgidas durante a fase de redução gradual da pressão a montante da bomba, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Grandezas para classificação da cavitação

	Grandezas Medidas	Grandezas Calculadas	Grandezas Marcadoras
Pfs	x		x
Pfr	x		
Ruído	x		x
Pc	x		
$NPSH_d$		x	
$NPSH_r$		x	
$\Delta NPSH$		x	x
H		x	
ΔH		x	x
σ_t		x	
Rend.		x	x

Os incrementos das grandezas marcadoras foram analisados para todas as vazões ensaiadas e resultaram na ferramenta de classificação do grau da cavitação neste experimento.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. $NPSH_r$

O ensaio de $NPSH_r$ conforme exemplificado para somente uma vazão ($0,0653 \text{ m}^3/\text{s}$) na tabela3, demonstra os passos seguidos para obtenção dos valores de pressão na sucção, nível de ruído, $\Delta NPSH$ e ΔH que caracteriza a cavitação incipiente.

Tabela 3 – $NPSH_r$ para a vazão de $0,0653 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Ruído dB	Carac.
0,0654	-8,7	53,8	205,3	234,9	0,0	75,8	Normal
0,0655	-10,4	52,1	203,1	234,4	-0,2	75,9	Normal
0,0653	-15,2	47,3	198,0	234,1	-0,3	76,1	Normal
0,0654	-20,8	41,7	191,8	233,5	-0,6	76,2	Normal
0,0653	-25,2	37,3	187,2	233,3	-0,7	76,6	Normal
0,0655	-30,3	32,2	181,7	232,9	-0,9	76,6	Normal
0,0653	-35,6	27,1	175,9	232,4	-1,1	77,0	Normal
0,0655	-40,0	22,7	171,3	232,2	-1,1	77,5	Normal
0,0654	-46,8	15,9	163,6	231,3	-1,5	78,4	Normal
0,0654	-51,5	11,2	157,9	230,3	-2,0	79,6	Normal
0,0654	-56,3	6,4	151,8	229,0	-2,3	80,8	ruído
0,0653	-59,8	2,9	148,0	228,7	-2,6	81,8	ruído
0,0653	-62,7	0,0	144,2	227,8	-3,0	83,1	cav. incip.

Em função da variação discreta na temperatura da água e da pressão atmosférica, o valor da pressão de sucção para praticamente todas as vazões para a operação com cavitação incipiente foi da ordem de -63 kPa, valor este atingido após cerca de 11 a 13 manobras da válvula de controle que simulou as perdas de cargas necessárias para a redução do $NPSH_d$. A figura 2 mostra os resultados do $NPSH_r$ para todas as vazões ensaiadas. A combinação deste ensaio com o de caracterização permitiu uma avaliação generalizada do comportamento do rendimento e ruído quando da bomba operando com cavitação em diferentes estágios.

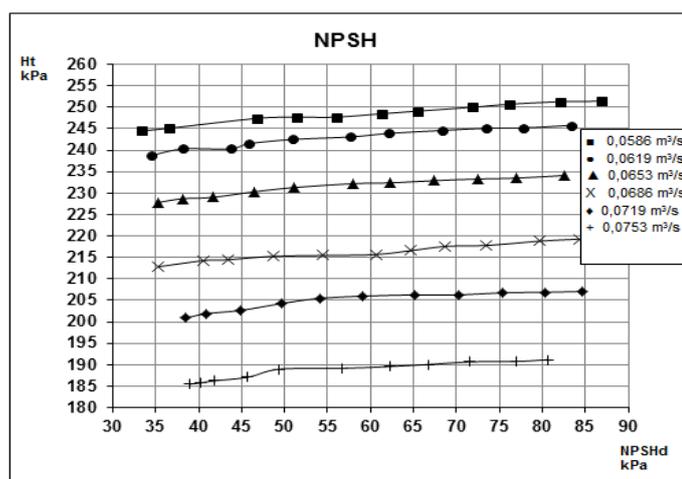


Figura 2- Gráfico do $NPSH_r$

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE CAVITAÇÃO

Para caracterização dos diferentes graus de cavitação denominados como reduzida, moderada e desenvolvida, o critério adotado foi a observação das medições e cálculos das grandezas

marcadoras apresentadas na tabela 2, onde incrementos significativos entre uma medição e outra seguinte com a redução de pressão na sucção, sinalizava uma mudança de faixa, a partir da análise das grandezas marcadoras. Durante a redução gradual de pressão através do estrangulamento da válvula de controle de aspiração, as variações entre estas grandezas marcadoras foram na maioria das vezes pouca significativas dentro de uma mesma faixa. Contudo a observação criteriosa e organizada de um número expressivo de repetições com vazões semelhantes ou diferentes determinou diferenças que puderam supor uma nova classificação da intensidade do fenômeno. Ressalta-se que em outro sistema hidrodinâmico estas variações por si só possam não caracterizar completamente a intensidade e classificação aqui convencionalizada, embora sirvam certamente de referência. A tabela 4 resume as medições e cálculos para somente uma vazão ($0,0653 \text{ m}^3/\text{s}$), para ilustrar a sequência de redução de pressão e as respectivas variações nas grandezas marcadoras:

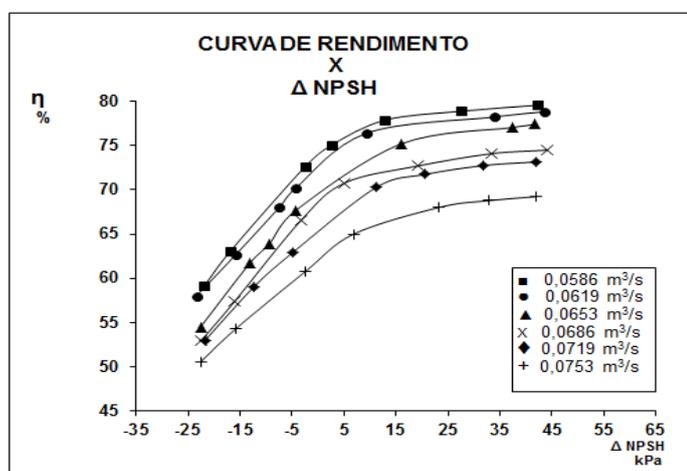
Tabela 4 – Grandezas de caracterização da cavitação

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ kPa	NPSH Δ %	Ht dB	Rend	Carac.
0,0655	-62,3	0,0	-3,0	82,8	72,5	Cav incipiente
0,0654	-65,1	-2,8	-7,8	84,3	68,5	Cav.critica
0,0654	-66,5	-4,2	-8,7	84,4	67,7	Cav.critica
0,0654	-71,6	-9,3	-13,6	86,6	63,9	Cav moderada
0,0655	-75,4	-13,1	-16,6	87,6	61,7	Cav moderada
0,0654	-79,8	-17,5	-17,7	89,3	60,3	Cav moderada
0,0654	-84,9	-22,6	-24,1	90,7	54,5	Cav desenv.

As pressões de sucção mantiveram-se com pequenas variações, sendo discretamente inferiores quanto maior a vazão ensaiada. A diferença entre o NPSH disponível e requerido para todas as vazões não excedeu a 2 kPa nos níveis de cavitação simulados e a diferença entre a altura manométrica total com a operação normal da bomba e com cavitação nestes níveis apresentados também esteve na ordem de 4 kPa para as vazões mínimas e máximas do experimento. O rendimento calculado e o ruído medido são demonstrados no item seguinte.

4.3. RENDIMENTO

Dentro da perspectiva de utilização dos resultados para classificação da cavitação e uso como ferramenta de diagnose, as correlações obtidas simultaneamente conforme gráficos das figuras 3 a 6 demonstram a intensidade do fenômeno com a queda de rendimento.

Figura 3: Rendimento do conjunto moto bomba em função do Δ NPSH

O rendimento, que combina o desempenho (Q e H) com a potência consumida neste ponto, conforme equação 6, mostra-se decrescente a partir de uma condição muito favorável de $NPSH_d$ até um limite inferior, aproximadamente 35% menor, na pior condição operacional, com a bomba operando com cavitação desenvolvida. Este caso pode apresentar risco de falha eminente por fadiga de componentes mecânicos.

Resultados semelhantes são obtidos, com as curvas da figura 4, decrescentes de acordo com o aumento do fator de Thoma que caracteriza condições desfavoráveis de aspiração da bomba ou redução do $NPSH_d$. Apesar das condições mais desfavoráveis para as vazões à direita do ponto melhor eficiência, a queda de rendimento mostra-se relativamente proporcional ao fator de Thoma para todas as vazões ensaiadas.

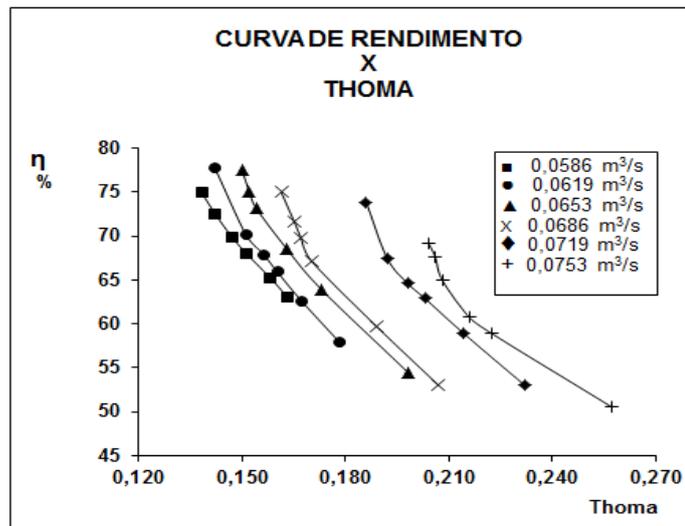


Figura 4- Rendimento do conjunto moto bomba em função do fator de Thoma

4.4. RUÍDOS

As medições de ruído com o conjunto moto bomba desligado ou fora de operação, somente com as interferências locais da instalação, foram da ordem de 67 dB. Em funcionamento em condições normais no início do teste de $NPSH_r$, houve um incremento de aproximadamente 7 dB gerados por fontes elétricas, hidrodinâmica e mecânica do próprio conjunto girante, ou seja para valores absolutos na ordem de 74 dB, e constituíram a base para comparação com a bomba funcionando com os diferentes níveis de cavitação, dependendo da vazão.

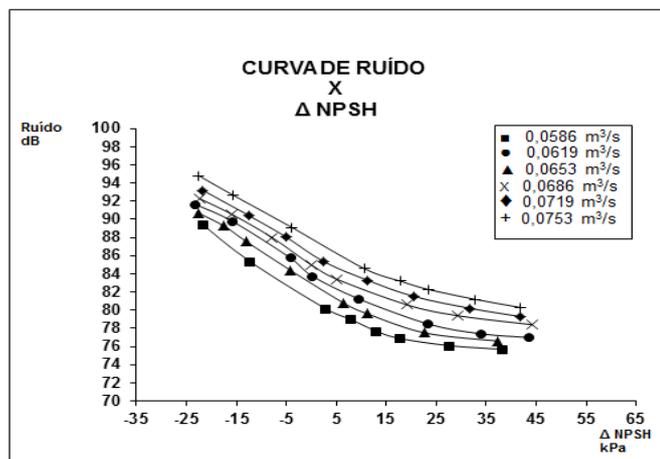


Figura 5- Nível de ruído em função do $\Delta NPSH$

A variação dos ruídos em função do $\Delta NPSH$ com reduções de pressão na sucção, apresentaram concordância para todas as vazões nos diferentes níveis de cavitação simulados, incipiente, reduzida, moderada e desenvolvida.

A expressiva diferença entre o nível de ruído entre a operação em condições normais e a cavitação incipiente na ordem de 7 dB para as respectivas vazões demonstra a relativa facilidade em categorizar este grau em conformidade com o ensaio padronizado, contudo após a redução contínua do $NPSH_d$, os ruídos apesar de aumentarem, o fazem com pequenos incrementos a cada um dos três níveis de cavitação, ou resumidamente, aumentaram em cerca 9 dB contudo distribuídos nos diferentes graus, o que requereu auxílio de outros marcadores para poder classificar a mudança discreta de faixa ou grau da cavitação.

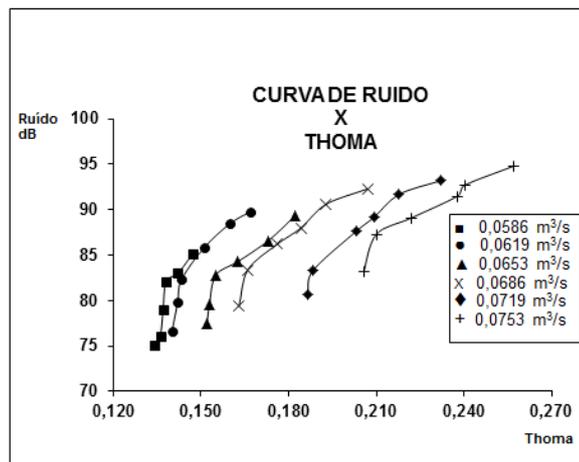


Figura 6- Nível de ruído em função do fator de Thoma

As tendências do ruído com o fator de Thoma σ_t demonstradas na figura 6 apresentam regiões distintas quer sejam: Condições favoráveis na sucção, com os menores valores de σ_t , e ruídos na ordem de 74 dB conforme Q; redução da pressão de sucção até a cavitação incipiente, com elevação dos níveis na ordem de 81 dB conforme Q; cavitação reduzida com valores na ordem de 83 dB conforme Q; cavitação moderada e elevação dos sinais acústicos em torno de 86 dB conforme Q e cavitação desenvolvida com os maiores valores de σ_t e níveis de ruídos na ordem de 90 dB conforme Q.

A Tabela 5 resume os critérios para a classificação da cavitação conforme a queda no rendimento do conjunto moto bomba e aumento do nível de ruído. A aceitação da operação da bomba nestas condições depende de fatores como custo da manutenção, perdas na produção e outros específicos dependentes da instalação, do processo e da confiabilidade exigida pelo sistema, contudo a recomendação contida na tabela 5, pode ser usada em inúmeras situações de operação com a bomba operando com cavitação.

Tabela 5: Critérios de classificação para os diferentes níveis de cavitação

Δ %	RENDIM.	Δ Db	RUÍDO Classific.	Aceitação	Prazo de Reação
de -6 a -9		7	Incipiente	Tolerável	Longo
de -10 a -12		de 8 a 9	Reduzida	Intervenção	Médio Prazo
de -13 a -20		de 10 a 12	Moderada	Intervenção	Imediato
de -21 a -30		de 13 a 16	Desenvolvida	Bloqueio	Imediato

Obs: Por médio prazo entende-se um tempo suficiente para analisar o sistema e procura de alternativas, para uma ação corretiva que minimize ou suprima as causas e efeitos da cavitação reduzida.

6. CONCLUSÕES

Para aplicação dos resultados de caracterização da intensidade de cavitação como ferramenta de diagnose em bombas centrífugas, é conveniente esclarecer como esta classificação motiva ações corretivas ou preventivas dos usuários em instalações industriais ou de utilidades.

Os níveis de aceitação e tempo de reação dependem dos riscos envolvendo a operação da bomba, como custos decorrentes de manutenção, perdas de produção ou mesmo acidentes.

Os resultados e análise deste experimento permitem elaborar uma ferramenta de análise e tomada de decisão onde o rendimento e o nível de ruído simultaneamente acrescenta confiabilidade no modo de classificar a cavitação e alerta sobre a necessidade da respectiva ação corretiva de acordo com o risco aceitável, da tabela 5.

O Δ Rendimento está expresso em função dos valores médios obtidos tanto na correlação com o Δ NPSH como no fator de Thoma e o Δ Ruído corresponde a variação entre o nível normal de operação e os subsequentes graus de cavitação aferidos.

A escolha do critério para analisar o estado operacional da bomba com cavitação nos diferentes estágios depende evidentemente da disponibilização das informações tanto do fabricante do equipamento como da configuração hidrodinâmica e análise do sistema instalado. Ensaio de ruído em conjunto com testes de desempenho e de NPSH_r podem ser solicitados e acompanhados. Quanto aos dados para rendimento, são facilmente obtidos, contudo requerem também os cálculos para formular as grandezas marcadoras, normalmente possível com uso de instrumentos de monitoramento já instalados e a intervenção de engenheiros com prática em sistemas hidrodinâmicos.

A utilização simultânea das grandezas marcadoras é recomendada como modo de melhorar a confiabilidade da análise, tendo em vista as dificuldades inerentes ao fenômeno instável como a cavitação.

REFERÊNCIAS

ALFAYEZ, L., e MBA, D. Detection of incipient cavitation and determination of the best efficiency point for centrifugal pumps using acoustic emission. Institution of Mechanical Engineers, vol.219, 20p., nov 2005.

CUDINA, M. e PREZELJ, J. Applied Acoustic. Detection of cavitation in operation of kinetic pumps. Use of discrete frequency tone in audible spectra, disponível em www.elsevier.com/locate/apacoust, acesso em 2013 fev 22.

HYDRAULIC INSTITUTE, Centrifugal Tests, 2000, acesso em 2014, set; disponível em www.pumps.org

PFLEIDERER, H.P. Máquinas de fluxo. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1972. 444P.

STEPANOFF, A.J. Centrifugal and axial flow pumps, John Wiley & Sons, 1957

THE WORLD PUMP MARKET, Relatório da European Industrial Forecasting Ltd, UK, acesso em 2014 set, disponível em <http://vwodward@eif4cast.com>

THOBIANI, A.; FENGSHOU, G.; e BALL, A. The Monitoring of Cavitation in Centrifugal Pumps based on the Analyses of Vibro-Acoustic Measurements. Stratford: University of Huddersfield, 2010. 10p.

TOMAS, M.T.C.D.L.G. Estudo do Fenômeno da Cavitação, Implementação de Técnicas Experimentais. Porto: Centro de Engenharia Civil da Universidade do Porto, 1986. 426p. (Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil).

TULLIS, J. P. Cavitação em Sistemas Hidráulicos. São Paulo: CTH USP, 1982. Apostila.

YEDIDIAH,S. Centrifugal Pumps User's Guidebook:Chapman&Hall,1996