

CAVITAÇÃO EM BOMBAS DINÂMICAS DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DE CALDEIRAS: ANÁLISE DO FENÔMENO E POSSÍVEIS SOLUÇÕES MITIGADORAS

L. L. Reche¹, D. G. Antello²

¹Universidade Santa Cecília, Santos, Brasil (leandroleitereche@outlook.com)

²Universidade Santa Cecília, Santos, Brasil

Este trabalho tem como objetivo analisar as ocorrências de cavitação em bombas dinâmicas de água de alimentação de caldeiras em estudo de caso da literatura, além de comentar as soluções empregadas, que buscaram reduzir a temperatura da água, e propor mais alternativas mitigadoras do fenômeno, como aumento do diâmetro das tubulações de sucção, diminuição do comprimento das linhas de sucção, reposicionamento do tanque de condensado e/ou das bombas e instalação de desaeradores na linha de sucção.

Palavras-chave: Cavitação; Bomba dinâmica; Caldeira

INTRODUÇÃO

A invenção e a operação de equipamentos e processos industriais na história produtiva recente da humanidade se deve, primordialmente, ao advento da primeira Revolução Industrial, que eclodiu na Inglaterra em meados do século XVIII. Nesse período histórico, surgiram máquinas movidas a vapor de água que revolucionaram, sobretudo na Europa, as linhas de produção, a mineração e a locomoção. Thomas Savery (1698), Thomas Newcomen (1712), James Watt (1765) e Richard Trevithick (1804) são algumas das personalidades da época que conceberam dispositivos a vapor de água de grande relevância (IF-UFRGS, s.d.).

Nos dias atuais, o uso do vapor de água é muito mais diversificado do que no século XVIII, em que seus principais empregos eram na mineração, nas locomotivas e em alguns processos produtivos. Hoje, a utilização varia desde geração de energia, aquecimento, esterilização de locais e objetos, pasteurização de alimentos e bebidas, propulsão e movimento, até hidratação e umidificação (Vaportec, s.d.; Togawa Engenharia, 2018; TLV, s.d.).

O vapor é gerado principalmente em equipamentos conhecidos como caldeiras, que podem ser compreendidos como trocadores de calor cuja pressão de operação é maior que a atmosférica, produzindo assim vapor a partir de energia térmica (queima de combustíveis convencionais, nuclear ou solar) ou ainda de energia elétrica. Existem caldeiras geradoras de vapor de água, de mercúrio ou de outros fluidos, sendo vapor de água comumente empregado como fluido de utilidades em processos produtivos industriais (Nogueira et al., 2005).

Para geração de grandes montantes de vapor, a alimentação de água nas caldeiras é feita principalmente por meio de bombas dinâmicas, em que se destacam as centrífugas, por conta da simplicidade de seus componentes, da facilidade de manutenção, das grandes vazões ofertadas (até 500000 L/h) e por operar em regime contínuo. Podem ser acionadas por motores elétricos ou ainda por turbinas a vapor (Nogueira et al., 2005).

Essas bombas estão sujeitas ao fenômeno de cavitação, que é a formação de bolhas de vapor na tubulação de sucção devido à pressão do fluido na entrada da bomba ser inferior ou igual à sua pressão de vapor na temperatura do escoamento. A cavitação é prejudicial, pois as bolhas de vapor, quando alcançam pontos de maior pressão, implodem e explodem bruscamente com grande liberação de energia, gerando vibrações e erosões diante da agitação e choques das partículas de líquido sobre as paredes sólidas do equipamento. Adicionalmente, a cavitação leva o rendimento da máquina a valores muito baixos (Brunetti, 2008).

O objetivo deste trabalho é analisar e interpretar as ocorrências de cavitação em bombas dinâmicas de água de alimentação de caldeiras retratadas em Feghali (2016), além de comentar as soluções empregadas e propor outras alternativas mitigadoras do fenômeno.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caldeiras

Caldeiras são equipamentos estáticos utilizados com objetivo de gerar e acumular vapor a pressões superiores à atmosférica. Em operação, podem fazer

uso de qualquer tipo de combustível sólido, líquido ou gasoso e são projetadas minuciosamente de acordo com códigos pertinentes, que garantem segurança na operação, manutenção facilitada e eficiência na produção de vapor (Brasil, 2018).

Diversos itens devem figurar em uma caldeira, dentre eles pode-se mencionar: válvula de segurança com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior à Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA), considerados os requisitos do código de projeto relativos a aberturas escalonadas e tolerâncias de calibração; instrumento que indique a pressão do vapor acumulado; injetor ou sistema de alimentação de água independente do principal que evite o superaquecimento por alimentação deficiente, acima das temperaturas de projeto, de caldeiras de combustível sólido não atomizado ou com queima em suspensão; sistema dedicado de drenagem rápida de água em caldeiras de recuperação de álcalis, com ações automáticas após acionamento pelo operador; sistema automático de controle do nível de água com intertravamento que evite o superaquecimento por alimentação deficiente (Brasil, 2018).

Esses equipamentos são agrupados de acordo com a literatura ou norma consultada. A Norma Regulamentadora n.º 13 (NR-13) agrupa as caldeiras em duas categorias: A e B. Os equipamentos da Categoria A possuem pressão de operação maior ou igual a 1 960 kPa e volume interno superior a 100 L. Já os dispositivos dispostos na Categoria B possuem pressão de operação entre 60 e 1 960 kPa (Brasil, 2018).

Já o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP) classifica as caldeiras em dois tipos: aquatubulares e flamotubulares. As aquatubulares são dotadas das seguintes características: concentram água/vapor no interior dos tubos e fogo/gases de combustão no exterior dos tubos; utilização em grandes complexos, com operação complexa que não permite paradas frequentes; devem ser abastecidas com água severamente tratada; produzem vapor saturado (VS) ou vapor superaquecido (VSA), com predominância de VSA; fornecem vapor a altas pressões (20 a 400 kgf/cm²) e a altas vazões (de 10 t/h a 1 800 t/h). Por sua vez, as flamotubulares possuem as seguintes características: concentram água/vapor no exterior dos tubos e fogo/gases de combustão no interior dos tubos; são de baixo custo quando comparadas às aquatubulares, no entanto apresentam baixo rendimento térmico; podem ser colocadas e retiradas de operação com maior facilidade do que as aquatubulares, além de possuírem maior tolerância para alimentação com água não tratada; produzem VS a baixas pressões (4 a 19 kgf/cm²) e a pequenas ou moderadas vazões (de algumas centenas de kg/h a 10 t/h) (IBP, 2020).

A Figura 1 apresenta esquema e principais componentes para caldeiras aquatubulares, em que: a = câmara de combustão; b = superaquecedor; c = feixe de tubos; d = tubos de queda; e = tambor superior; f = tambor inferior; g = acessórios do tubulão; h = economizador; i = pré-aquecedor de ar.

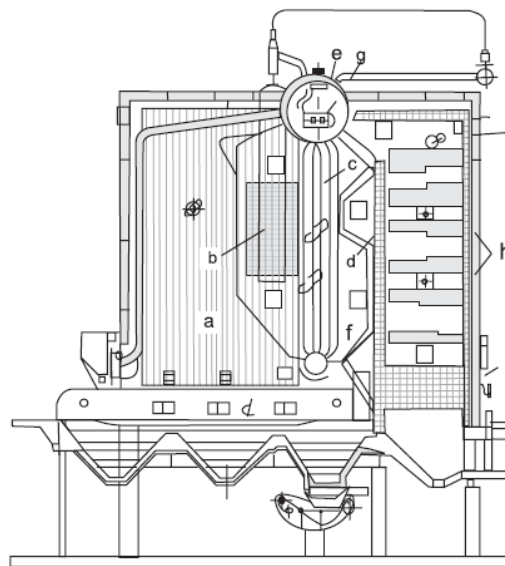


Figura 1. Esquema de caldeira aquatubular e seus principais componentes (Nogueira et al., 2005).

A Figura 2 mostra esquema e principais componentes para caldeiras flamotubulares, em que: a = corpo da caldeira; b = câmara de inversão; c = tubo de fogo; d = câmara de descarga; e = câmara anterior; f = ciclone; g = chapas de choque; h = tubo de descarga; i = queimador copo rotativo; j = ventoinha; k = quadro inferior; l = bombas de óleo; m = pré-aquecedor de óleo; n = painel de comando; o = bombas de alimentação; p = passarela.

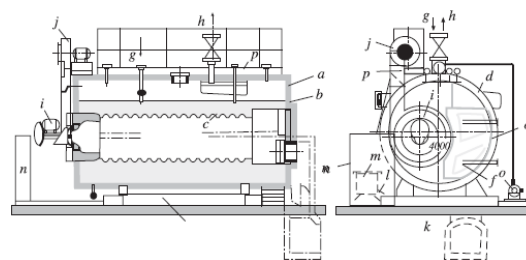


Figura 2. Esquema de caldeira flamotubular e seus principais componentes (Nogueira et al., 2005).

Bombas centrífugas

Bombas centrífugas são máquinas usadas com propósito de transferir quantidades de fluidos líquidos de um local para outro. São classificadas como bombas dinâmicas, isto é, transformam energia mecânica rotativa em energia cinética na forma de velocidade e pressão no fluido (Alfa Laval, 2001).

Esses dispositivos centrífugos são responsáveis pela alimentação de caldeiras que produzem elevadas vazões de vapor, como as aquatubulares, graças à simplicidade de seus componentes, facilidade de manutenção e operação em regime contínuo a elevadas vazões de água alimentada (Nogueira et al., 2005).

A sucção de água por esses equipamentos ocorre pelo giro, em alta velocidade, de um elemento chamado rotor (ou impelidor), que é constituído de um jogo de pás (ou palhetas) dispostas em um disco, cuja quantidade varia de acordo com a capacidade da bomba. Cada estágio nesses dispositivos é formado por um disco: para caldeiras de baixa pressão, empregam-se bombas de um único estágio (1 disco); já nas caldeiras de alta pressão, usam-se bombas de múltiplos estágios (mais de 1 disco), como exemplificado na Figura 3 (Nogueira et al., 2005).

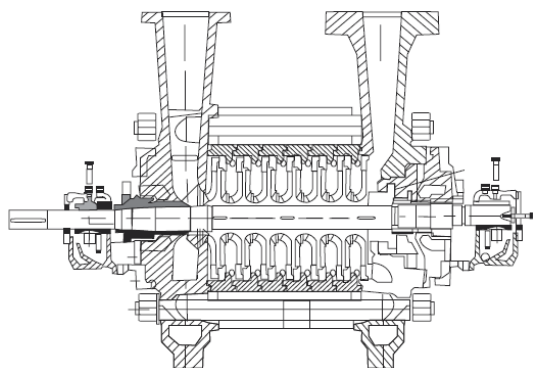


Figura 3. Esquema de bomba centrífuga de alta pressão para caldeiras (Nogueira et al., 2005).

Essa vertente de equipamentos dinâmicos pode ter seu acionamento realizado via motor elétrico ou turbina a vapor, sendo essa última aplicada somente em geradores de vapor de maiores capacidades e pressões. Além disso, bombas centrífugas normalmente possuem carcaça cilíndrica e bipartida (Nogueira et al., 2005).

Cavitação

Cavitação é um fenômeno em que são formadas bolhas de vapor em um líquido que posteriormente colapsam, colocando em risco a integridade mecânica de equipamentos dinâmicos, como bombas, e prejudicando severamente seu rendimento (Lahr, 1999).

Tais bolhas são geradas em zonas nas quais a pressão de operação tem chances de atingir valores inferiores à pressão de vapor do líquido na temperatura de escoamento – em bombas dinâmicas, ocorre na tubulação de sucção – e o colapso dessas bolhas acontece em regiões em que a pressão de operação volta a ser superior à pressão de vapor, o que

acontece usualmente já dentro do dispositivo (Lahr, 1999).

Os efeitos da cavitação são sempre nocivos aos equipamentos dinâmicos. No período compreendido entre a formação das bolhas de vapor e o momento anterior ao seu colapso, verifica-se habitualmente os seguintes distúrbios: o fluxo do dispositivo é reduzido diante do deslocamento que ocorre no líquido por ação das bolhas de vapor; verifica-se desequilíbrio mecânico diante da presença de vapores leves nas passagens do impelidor do equipamento rotativo; vibrações, desvio ou quebra de eixo, falhas de rolamento, vazamentos no selo mecânico e/ou na vedação (Lahr, 1999).

Com o colapso das bolhas, os revezes notados usualmente são: danos mecânicos oriundos da implosão das bolhas, que libera energia suficiente para remover segmentos do material do impelidor; vibração e barulho no equipamento, que soa como se um pedaço de cascalho estivesse sendo bombeado (esse ruído é um dos primeiros sinais de que está ocorrendo cavitação) (Lahr, 1999).

A cavitação ocorre comumente em bombas, mas também pode acometer outros sistemas hidráulicos como hélices de embarcações e válvulas reguladoras. Em geral, essa manifestação é favorecida em situações em que o aumento da velocidade de escoamento de um líquido resulta na diminuição de sua pressão a valores inferiores à pressão de vapor, contexto frequentemente observado na tubulação de sucção de bombas (Lahr, 1999).

As Figuras 4 e 5 evidenciam danos erosivos em rotores (também conhecidos como impelidores ou impulsores) de equipamentos rotativos acometidas por cavitação.



Figura 4. Rotores de turbinas danificados por cavitação (Camargo, 2018).



Figura 5. Rotores em aço inoxidável 316 danificados por cavitação (Dow Brasil, 2002).

Net Positive Suction Head (NPSH)

Com objetivo de evitar a ocorrência de cavitação, deve-se garantir que a pressão local em todas as zonas do equipamento dinâmico tenha valor superior à pressão de vapor do líquido bombeado na temperatura de escoamento. Como é mais simples medir ou estimar a pressão na entrada de bombas, ou seja, em sua tubulação de sucção, os parâmetros de cavitação são usualmente conceituados na entrada desses equipamentos (Çengel e Cimbala, 2015).

Um dos critérios de escoamento mais importantes para determinação da ocorrência ou não de cavitação é o *Net Positive Suction Head (NPSH)*, que pode ser traduzido como Carga de Sucção Positiva Líquida, em que carga (*head*) é definida como energia por unidade de peso (Çengel e Cimbala, 2015; Souza, 2014).

Existem duas modalidades de *NPSH*: o requerido (*NPSH_r*), interpretado fisicamente como a quantidade mínima de energia absoluta por unidade de peso acima da pressão de vapor do líquido bombeado, que deve existir no flange de sucção para que não haja cavitação; e o disponível (*NPSH_d*), interpretado fisicamente como a energia absoluta por unidade de peso existente no flange de sucção, acima da pressão de vapor do líquido bombeado (Mattos e Falco, 1998).

Em geral, o *NPSH_r* é fornecido nas curvas de bomba geradas pelos fabricantes a partir de testes de desempenho. Além disso, é função da vazão volumétrica de fluido bombeado (*Q*) e pode ser determinado a uma vazão qualquer através da Equação 1, se o seu valor for conhecido para uma única vazão (Neutrium, 2012).

$$\frac{NPSH_{r_2}}{NPSH_{r_1}} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 \quad (1)$$

Em que (considerando unidades do Sistema Internacional):

- *NPSH_r* = Carga de sucção positiva líquida requerida (m);
- *Q* = Vazão volumétrica de fluido bombeado (m³/s).

Por sua vez, o *NPSH_d* é a diferença entre a carga absoluta na entrada da bomba ($h_{sp} \pm h_z - h_f$) e a carga de pressão de vapor do líquido na temperatura de escoamento (h_{vp}). Pode ser calculado através da Equação 2 (adaptado de Neutrium, 2012).

$$NPSH_d = h_{sp} \pm h_z - h_f - h_{vp} \quad (2)$$

Em que (considerando unidades do Sistema Internacional):

- *NPSH_d* = Carga de sucção positiva líquida disponível (m);
- h_{sp} = Carga de pressão absoluta na superfície livre do líquido no tanque (m);
- h_z = Altura de sucção, que pode ser positiva ou negativa (m);
- h_f = Perda de carga por atrito na sucção (m);
- h_{vp} = Carga de pressão de vapor do líquido na temperatura de operação (m).

O *NPSH_d* também pode ser expresso por intermédio da equação de Bernoulli, assumindo o formato da Equação 3 (adaptado de White, 2011).

$$NPSH_d = \frac{P}{\gamma} \pm Z - LW - \frac{P_v}{\gamma} \quad (3)$$

Em que (considerando unidades do Sistema Internacional):

- *NPSH_d* = Carga de sucção positiva líquida disponível (m);
- *P* = Pressão absoluta na superfície livre do líquido no reservatório (Pa);
- γ = Peso específico do líquido na temperatura de escoamento (N/m³);
- *Z* = Altura de sucção, que pode ser positiva ou negativa (m);
- *LW* = Perda de carga por atrito na sucção (m);
- P_v = Pressão de vapor do líquido na temperatura de escoamento (Pa).

A Figura 6 apresenta as curvas de carga líquida da bomba (*H*), *NPSH_r* e *NPSH_d* como função da vazão volumétrica (*Q*) de líquido. Além disso, são evidenciadas as regiões de ocorrência e de não ocorrência de cavitação (adaptado de Çengel e Cimbala, 2015).

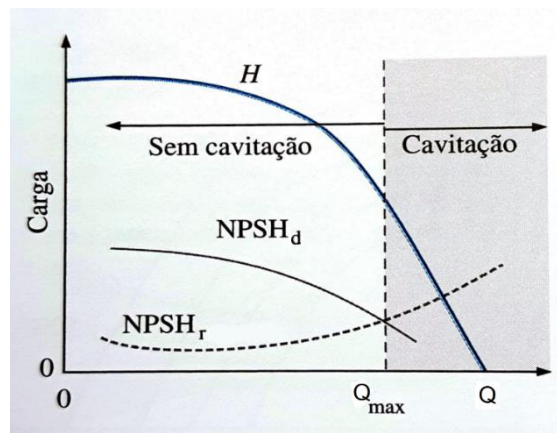


Figura 6. Curvas de *H*, *NPSH_r* e *NPSH_d* como função de *Q* (adaptado de Çengel e Cimbala, 2015).

Portanto, para garantir que uma bomba de fato não cavite, o $NPSH_d$ precisa ser maior do que o $NPSH_r$, isto é, a diferença entre eles precisa ser positiva. Além disso, recomenda-se como margem de segurança que essa diferença entre $NPSH_d$ e $NPSH_r$ seja de, pelo menos, 0,6 m (Mattos e Falco, 1998).

Desaeradores

Bastante empregado com intuito de mitigar a ocorrência de cavitação em bombas dinâmicas de água de alimentação de caldeiras, o desaerador (também conhecido como degaseador ou degaseificador) é um equipamento que tem por finalidade eliminar gases não condensáveis que se encontrem dissolvidos na água que será bombeada, como oxigênio (O_2), dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) (Nogueira et al., 2005).

Esse dispositivo é responsável por alimentar as bombas dinâmicas que, em seguida, fornecerão água já desaerada a caldeiras geradoras de vapor. Sem desaeração, os gases incondensáveis presentes no líquido escapariam na forma de bolhas graças à queda de pressão na tubulação de sucção da bomba. Tais bolhas, ao adentrar o equipamento dinâmico, colapsariam em zonas de maior pressão desprestendendo quantidade de energia suficiente para causar danos mecânicos comprometedores à atividade do equipamento.

Dois tipos de desaeradores comumente empregados são o desaerador à pulverização e o de cascata. A Figura 7 apresenta esquema de um degaseificador à pulverização, que dispersa a água em gotas de pequenas dimensões por meio de pulverizadores em sua câmara de vapor. Tal arranjo resulta em maior superfície de contato entre as fases líquida (água a ser posteriormente bombeada) e vapor (do próprio degaseador) (Nogueira et al., 2005).

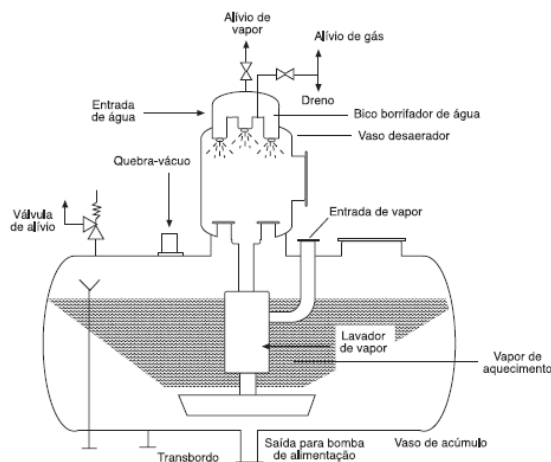


Figura 7. Esquema de desaerador à pulverização (Nogueira et al., 2005).

Já o desaerador de cascata (ou de bandejas) funciona por fluxo em contracorrente: a água a ser desaerada escoar de um distribuidor superior em sentido descendente, gerando cascatas múltiplas, e o vapor do equipamento flui em sentido ascendente (Nogueira et al., 2005).

A fase líquida é aquecida pelo vapor ao longo do trajeto até o vaso de reserva, na base do degaseador. Por sua vez, a fase vapor possui uma fração que condensa, assim escoando com a fase líquida até o vaso de reserva, e uma fração que escapa para a atmosfera, levando consigo os gases não condensáveis (Nogueira et al., 2005).

Há mais de um modelo dessa classe de degaseificador. A Figura 8 explicita uma variação mais moderna desse dispositivo, aplicando bandejas perfuradas que geram uma gama de jatos de água com geometria cilíndrica em queda vertical, o que aumenta a superfície de contato das fases líquida e vapor, otimizando assim a transferência de massa dos gases incondensáveis da água para o vapor (Nogueira et al., 2005).

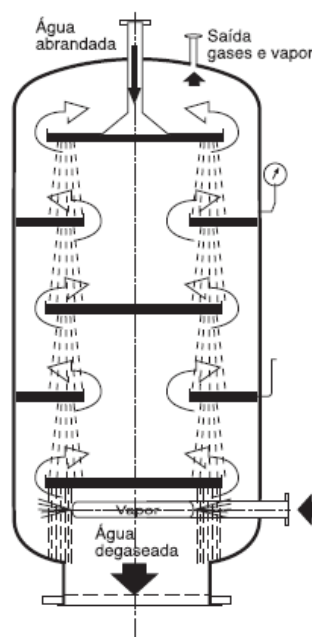


Figura 8. Esquema de desaerador de bandejas perfuradas (Nogueira et al., 2005).

Os desaeradores operam majoritariamente com pressão interna ligeiramente acima da pressão atmosférica, de forma a permitir o escape dos gases não condensáveis arrastados pelas bolhas de vapor em excesso. Assim, a água desaerada oferece menor risco à bomba no contexto da cavitação (Nogueira et al., 2005).

As Figuras 9 e 10 exemplificam, respectivamente, desaeradores de água à pulverização e de cascata.



Figura 9. Desaerador de água à pulverização (Heatmec, s.d.).



Figura 10. Desaerador de água de cascata (Solution Controles, 2018).

Apresentação do estudo de caso da literatura

Os dados e figuras apresentados nesta seção são advindos de Feghali (2016), que analisa a ocorrência de cavitação em bombas dinâmicas de água de alimentação de caldeiras em uma planta de cogeração fornecedora de diversos insumos e utilidades para uma fábrica de refrigerantes vizinha.

Essa planta tem sua operação focada em três motores à combustão que queimam gás natural para gerar energia elétrica para a fábrica e, caso haja excedente, transmiti-lo à concessionária local. Os gases de queima advindos dos motores são tratados com intuito de isolar e purificar o gás carbônico (CO_2) até alcançar 99,9992% de pureza para poder ser introduzido nos refrigerantes.

O vapor de água gerado nas três caldeiras dessa planta, a 6,5 bar, é empregado, principalmente, para o processo de separação do gás carbônico dos demais gases de combustão. Esse procedimento consiste, de maneira simplificada, no vapor aquecer monoetanolamina (MEA) que, ao atingir a temperatura de 50 °C, captura o CO_2 em sua molécula e, a 110 °C, tem sua estrutura molecular alterada e assim libera o CO_2 .

A Figura 11 apresenta a vista frontal das três caldeiras a gás natural: ATA-24, DanPower e ATA-22.



Figura 11. Vista frontal das caldeiras a gás natural (adaptado de Feghali, 2016).

As três bombas de água de alimentação das caldeiras da planta são dinâmicas: duas, Schneider ME-2475 e Schneider ME-2375, são centrífugas e uma, KSB Movitec VF 10/10, é de fluxo axial.

As Figuras 12, 13 e 14 mostram, respectivamente, as bombas dinâmicas Schneider ME-2475, KSB Movitec VF 10/10 e Schneider ME-2375, que, nessa ordem, alimentam as caldeiras ATA-24, DanPower e ATA-22.

Os operadores das caldeiras relatam cavitação nas bombas quando as três caldeiras estão em operação ou em qualquer combinação de duas caldeiras ligadas.



Figura 12. Bomba Schneider ME-2475, que alimenta a caldeira ATA-24 (adaptado de Feghali, 2016).



Figura 13. Bomba KSB Movitec VF 10/10, que alimenta a caldeira DanPower (adaptado de Feghali, 2016).



Figura 14. Bomba Schneider ME-2375, que alimenta a caldeira ATA-22 (adaptado de Feghali, 2016).

Análise de $NPSH_d$ e $NPSH_r$

A confirmação da ocorrência de cavitação, assim como a investigação das possíveis causas e a verificação das soluções cabíveis ao problema deve partir do saldo da subtração entre $NPSH_d$ e $NPSH_r$.

A Tabela 1 apresenta os resultados da diferença entre $NPSH_d$ e $NPSH_r$ calculados para as sete possíveis combinações de uso das caldeiras da planta e suas respectivas bombas de alimentação. Os destaques em verde indicam que a margem de segurança recomendada para a diferença entre $NPSH_d$ e $NPSH_r$ (de pelo menos 0,6 m) foi respeitada e, portanto, não houve cavitação; em amarelo, a margem de segurança não foi atingida, porém não foi observada cavitação; em rosa, é salientado o fenômeno de cavitação.

Tabela 1. Resultados, em metro (m), da diferença entre $NPSH_d$ e $NPSH_r$ (adaptado de Feghali, 2016).

Combinação	ATA-24	DanPower	ATA-22
(1)	-	-	0,802
(2)	-	0,225	-
(3)	1,150	-	-
(4)	-	-0,091	0,448
(5)	0,913	0,032	-
(6)	0,962	-	0,631
(7)	0,567	-0,401	0,139

A partir da análise da Tabela 1, verifica-se que quando somente uma das caldeiras está em operação, o que acontece nas combinações (1), (2) e (3), não há ocorrência de cavitação nas bombas de alimentação, pois $NPSH_d > NPSH_r$. Vale destacar que a combinação (2), com a caldeira DanPower funcionando sozinha, não atinge a margem de segurança recomendada para a diferença entre $NPSH_d$ e $NPSH_r$.

A combinação (4), com DanPower e ATA-22 operando concomitantemente, mostra que a bomba KSB Movitec VF 10/10 cavita, pois $NPSH_d < NPSH_r$. Já a bomba Schneider ME-2375 não cavita, porém não atinge a margem de segurança mencionada.

Na combinação (5), em que ATA-24 e DanPower trabalham em conjunto, nota-se que a bomba KSB Movitec VF 10/10 está muito abaixo da margem de segurança e próxima de atingir a cavitação.

A combinação (6), com ATA-24 e ATA-22 ligadas, não apresenta problemas. Por sua vez, a combinação (7), com todas as caldeiras em funcionamento, denota cavitação na bomba KSB Movitec VF 10/10. Adicionalmente, Schneider ME-2475 e Schneider ME-2375 ficam abaixo da margem de segurança para não ocorrência de cavitação.

A combinação (4), com DanPower e ATA-22 operando, é a mais empregada, pois a caldeira ATA-24 não possui instrumentação quantificadora de vazão de vapor gerado. Já a combinação (6), com ATA-24 e ATA-22 em funcionamento, é a segunda mais utilizada, pois as bombas alimentadoras não cavitam.

Possível justificativa para cavitação da bomba KSB Movitec VF 10/10

A partir da análise feita nos dados da Tabela 1, é possível afirmar que a combinação (6), com ATA-24 e ATA-22 operando, é a configuração mais segura

para geração de vapor sem que haja cavitação nas respectivas bombas de alimentação (Schneider ME-2475 e Schneider ME-2375).

Entretanto, em diversos momentos, as três caldeiras precisarão funcionar juntas para atender a demanda de vapor, o que faria a bomba alimentadora de DanPower (KSB Movitec VF 10/10) ser danificada com o tempo de operação graças à possível cavitação que sofreria.

É mencionado no trabalho consultado que DanPower é uma caldeira nova, pois antes só operavam ATA-24 e ATA-22, e que não houve análise de projeto para introduzir o novo equipamento. Dessa forma, essa introdução foi o estopim para os problemas de cavitação.

A justificativa apresentada foi que o aumento da vazão volumétrica de água para alimentar KSB Movitec VF 10/10, sem troca do diâmetro das tubulações de sucção das bombas, causou diminuição do $NPSH_d$ e aumento do $NPSH_r$, graças ao aumento da perda de carga por atrito, como sugerem as Equações 1, 2 e 3 e a Figura 6.

Soluções temporárias e definitivas

Existem diversas soluções possíveis para mitigar a ocorrência de cavitação nas bombas dinâmicas que alimentam as três caldeiras da planta. Algumas delas são de caráter temporário, ou seja, a curto prazo resolvem o problema, entretanto podem trazer prejuízos e revezes à companhia a médio e longo prazo se mantidas em operação. Outras são de caráter definitivo, isto é, são planejadas e executadas de forma a cessar completamente o problema e ainda não acarretar prejuízos e revezes à empresa a médio e longo prazo.

Um exemplo de solução temporária é a que os operadores dos equipamentos já estavam realizando: reduzir a temperatura da água de alimentação na sucção das bombas. Tal procedimento resulta em diminuição da pressão de vapor do líquido, conforme mostra a Figura 15, e, por consequência, aumenta o $NPSH_d$, como indicam as Equações 2 e 3.

A água a ser bombeada fica armazenada em tanques de condensado de processo, mostrados na Figura 16. Nesses reservatórios, a temperatura do fluido varia de 40 a 100 °C, com longos períodos a 100 °C e ocorrência de vaporização da água, como indica o histórico do dispositivo de medição de temperatura na Figura 17.

Uma fração do retorno de água condensada do processo é descartada em um ralo antes de entrar no tanque, o que faz o nível do reservatório baixar e assim abrir uma válvula pneumática que permite a entrada de água de reposição da concessionária local,

a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE), em temperatura ambiente.

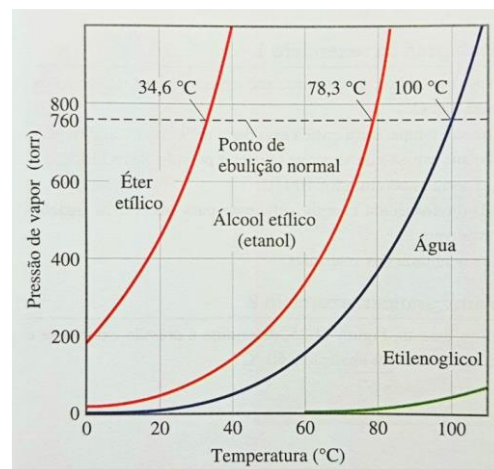


Figura 15. Curvas de pressão de vapor em função da temperatura para éter etílico, álcool etílico (etanol), água e etilenoglicol (Brown et al., 2016).



Figura 16. Tanques de condensado de processo, cuja água armazenada alimenta as bombas dinâmicas utilizadas na planta (Feghali, 2016).



Figura 17. Histórico de temperatura de condensado a cada hora (Feghali, 2016).

Essa solução temporária foi implementada rapidamente para mitigação emergencial do fenômeno de cavitação, porém não é vantajosa economicamente, já que desperdiça energia térmica do condensado e traz despesas extras com água de reposição da concessionária, pois só eram previstos em projeto 30% de reposição de água no tanque.

Como exemplos de soluções definitivas, pode-se mencionar o aumento do diâmetro das tubulações de sucção das bombas de modo a diminuir a perda de carga por atrito conferida ao projeto devido ao aumento de vazão volumétrica. Esse procedimento aumentaria o valor de $NPSH_d$, como assinalam as Equações 2 e 3.

Também visando a diminuição da perda de carga por atrito, é possível reduzir o comprimento das linhas de sucção, que conectam o tanque de condensado a cada uma das bombas dinâmicas. Quanto menor o trajeto a ser percorrido pela água, menos atrito haverá entre as camadas de fluido e com as paredes da tubulação.

O reposicionamento do tanque de condensado e até mesmo das bombas pode ser uma alternativa, já que possibilitaria acréscimo na altura de sucção e consequente aumento de $NPSH_d$.

Por fim, ainda pode ser considerada a instalação de desaeradores entre o tanque de condensado e a sucção das bombas, de modo a eliminar bolhas de vapor e gases não condensáveis que se encontrem dissolvidos na água que será bombeada.

CONCLUSÃO

O vapor de água é uma utilidade de processo fundamental em praticamente todos os segmentos industriais, sendo empregado para geração de energia elétrica, movimentação de agentes mecânicos, aquecimento, higienização, dentre outros usos.

É gerado em equipamentos estáticos conhecidos como caldeiras a partir da vaporização de água líquida previamente transportada por bombas dinâmicas, predominantemente centrífugas.

Esses equipamentos dinâmicos são comumente afligidos por um fenômeno prejudicial à sua atividade e durabilidade chamado cavitação, que consiste na formação de bolhas de vapor em regiões em que a pressão absoluta do líquido é inferior à sua pressão de vapor na temperatura de operação. Tais bolhas implodem quando atingem regiões de alta pressão no interior do equipamento, liberando grandes quantidades de energia e causando danos ao rotor, ao eixo, à voluta e a outras partes da bomba.

Na análise de caso observado na literatura, que descreve a ocorrência de cavitação em um sistema composto de três bombas dinâmicas alimentadoras de caldeiras geradoras de vapor de água, verificou-se a possibilidade de cinco soluções mitigadoras do fenômeno: redução da temperatura da água de alimentação das bombas; aumento do diâmetro das tubulações de sucção; diminuição do comprimento das linhas de sucção; reposicionamento do tanque de condensado e/ou das bombas; e instalação de desaeradores nas linhas de sucção.

REFERÊNCIAS

- ALFA LAVAL. **Alfa Laval pump handbook**. 1. ed. 2001.
- BRASIL. Portaria nº 1.082, de 18 de dezembro de 2018. Altera a Norma Regulamentadora n.º 13 (NR-13) - Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulação. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 dez. 2018, Edição 244, Seção 1, p. 208.
- BROWN, T. L.; LEMAY JR, H. E.; BURSTEN, B. E.; MURPHY, C. J.; WOODWARD, P. M.; STOLTZFUS, M. W. **Química: a ciência central**. 13. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- CAMARGO, M. **O que é cavitação?** 2018. Disponível em: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2018/08/07/o-que-e-cavitacao/>. Acesso em: 06 mai. 2023.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2015.
- DOW BRASIL. **Rotores em aço inoxidável 316 danificados pelo fenômeno de cavitação**. 2002.
- FEGHALI, A. K. **Análise de cavitação em bombas de alimentação de caldeiras de uma fábrica de bebidas e projeto de solução**. 2016. Projeto Final (Graduação) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- HEATMEC. **Desaerador de água**. Disponível em: <https://www.heatmec.com.br/desaerador-agua>. Acesso em: 06 mai. 2023.
- IBP - INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Inspeção de caldeiras**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBP, 2020.
- IF-UFRGS - INSTITUTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Máquina a vapor**. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~leila/vapor.htm#:~:text=Em%201698%2C%20mais%20de%20mil,de%20vapor%20a%20alt%20press%C3%A3o>. Acesso em: 06 mai. 2023.
- LAHR, P. T. Cavitation and NPSH in centrifugal pumps. **The Pump Handbook Series**, 1999.
- MATTOS, E. E; FALCO, R. **Bombas industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- NEUTRIUM. **Pump cavitation and NPSH**. 2012. Disponível em: <https://neutrium.net/equipment/pump-cavitation-and-npsh/>. Acesso em: 06 mai. 2023.
- NOGUEIRA, L. A. H; ROCHA, C. R; NOGUEIRA, F. J. H. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.
- SOLUTION CONTROLES. **Desaerador atmosférico ADG**. 2018. Disponível em: https://www.solutioncontroles.com.br/explorer/fichatecnica/ficha_1667581194.pdf. Acesso em: 06 mai. 2023.
- SOUZA, P. H. A. I. **Apresentação dos cálculos para seleção de bomba para sistema de reaproveitamento de**

água de poços artesianos. 2014. Projeto Final (Graduação) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

TLV. **Principais aplicações para vapor.** Disponível em: https://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/principal-applications-for-steam.html#toc_1. Acesso em: 06 mai. 2023.

TOGAWA ENGENHARIA. **Uso do vapor na indústria.** 2018. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/uso-do-vapor-na-industria/>. Acesso em: 06 mai. 2023.

VAPORTEC. **Qual a utilidade do vapor na indústria?** Disponível em: <https://www.vaportec.com.br/ind/2020/05/21/qual-a-utilidade-do-vapor-na-industria/#:~:text=O%20uso%20do%20vapor%20na,pasteuriza%C3%A7%C3%A3o%20de%20alimentos%20e%20bebidas>. Acesso em: 06 mai. 2023.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos.** 6. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2011.