

# ANÁLISE DE VIBRAÇÃO E PULSAÇÃO DE PRESSÃO EM UMA ESTAÇÃO DE BOMBEIO DE ÓLEO

**Antonio Lopes Gama**

Universidade Federal Fluminense, Dep. de Eng. Mecânica, 24210-000, Niterói, RJ, Brasil,  
[agama@mec.uff.br](mailto:agama@mec.uff.br)

**Ediberto Bastos Tinoco**

PETROBRAS / CENPES, Engenharia Básica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,  
[ediberto@cenpes.petrobras.com.br](mailto:ediberto@cenpes.petrobras.com.br)

**João Bernardo da Gama Oberg**

Universidade Federal Fluminense, Dep. de Eng. Mecânica, 24210-000, Niterói, RJ, Brasil,  
[bernardo\\_oberg@yahoo.com.br](mailto:bernardo_oberg@yahoo.com.br)

**Resumo.** *Este trabalho apresenta os resultados de um estudo sobre problemas provocados por vibração excessiva nas tubulações de uma estação de bombeio de óleo da PETROBRAS. Na análise experimental foram realizadas medições de aceleração e pressão em diversos pontos dos ramais de sucção e descarga das bombas alternativas responsáveis pelo bombeio do óleo. Um modelo baseado na propagação de ondas planas foi desenvolvido para a análise acústica das tubulações dos referidos ramais. Os resultados desta análise foram comparados com o espectro em frequência da pressão obtido experimentalmente, comprovando a ocorrência de ressonâncias acústicas nas tubulações. Ao final são propostas modificações nas tubulações de sucção e descarga das bombas alternativas para eliminar os problemas de vibração.*

**Palavras-chave:** *Tubulações, vibração, pulsação de pressão*

## 1. INTRODUÇÃO

Embora a principal ênfase na fase de projeto de um sistema de tubulações seja dada aos esforços gerados pela pressão, peso e variações de temperatura, a vibração tem sido a causa mais freqüente de falhas em tubulações (Wachel, 1981). De fato, a grande demanda de solicitação de estudo de casos de vibração em tubulações da PETROBRAS comprovam a importância dos fenômenos dinâmicos em tubulações. O presente trabalho apresenta os resultados da análise de vibração na unidade de bombeio de óleo do Estreito B (ET-B) para Guamaré, no estado do Rio Grande do Norte, realizada pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense e a Engenharia Básica do Centro de Pesquisas Leopoldo A. Miguez de Mello, da PETROBRAS.

A unidade de bombeio apresentou falhas crônicas de fadiga causadas por vibração excessiva que chegaram a causar a interrupção das operações na unidade. As vibrações ocorriam nas tubulações de sucção e descarga das sete bombas triplex alternativas *Lufkin-Gaso*. Os ramais de sucção e descarga destas bombas estão representados isoladamente na Fig.(1). A análise de vibração consistiu em medições

de vibração e pulsação de pressão e simulações numéricas para identificação das frequências naturais acústicas e elásticas dos ramais de sucção e descarga.

Para a simulação acústica das tubulações, foi desenvolvido um modelo utilizando matrizes de transferência, construídas com base na hipótese de propagação de ondas planas. Neste modelo, o sistema de tubulações é representado por uma combinação de elementos acústicos discretos interconectados.

O resultado das medições permitiu concluir que as elevadas pulsações de pressão observadas nos ramais de sucção e descarga são as principais fontes de vibração destes sistemas. Ao comparar os resultados das medições de pulsação de pressão com os resultados da simulação acústica dos ramais de descarga, conclui-se que os altos níveis das pulsações de pressão ocorriam devido à existência de ressonâncias acústicas.

Conclui-se também que as trincas de fadiga que surgiram nas junções dos ramais de descarga com o *header* de descarga, e nas junções entre os ramais de sucção com o *header* de sucção, foram causadas pelos altos forçamentos dinâmicos provenientes da pulsação de pressão. Neste aspecto, a geometria da tubulação colaborou com o agravamento dos esforços nas referidas junções.

Com base na identificação do mecanismo de geração das falhas por fadiga e na identificação da principal fonte de vibração nos sistemas de sucção e descarga das bombas *Lufkin-Gaso*, foram propostas modificações nos sistemas de tubulação para eliminar os problemas de vibração.

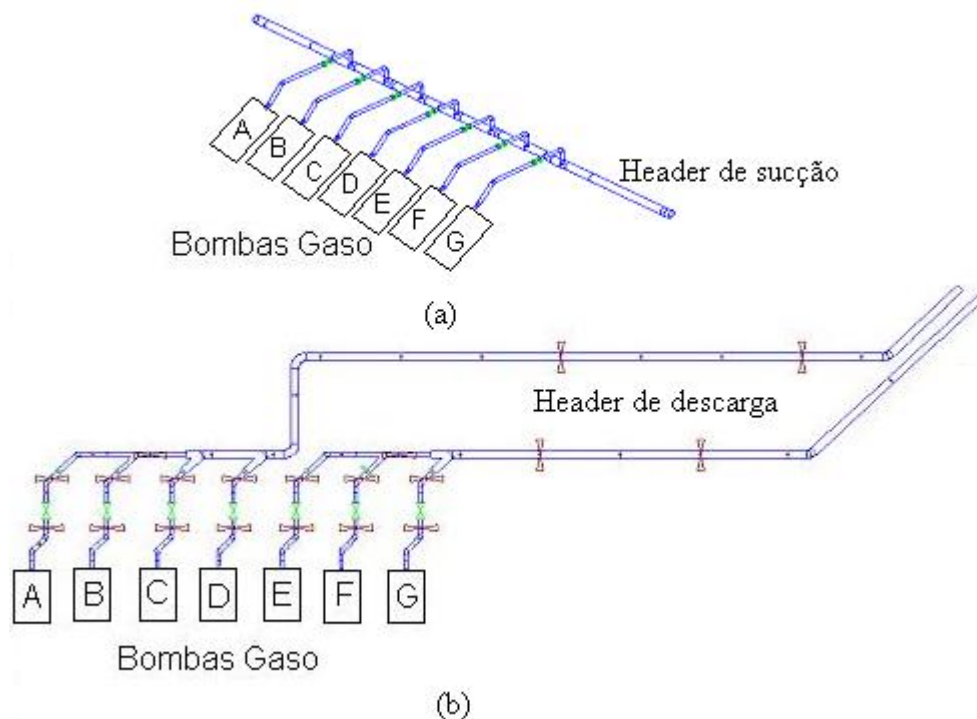


Figura 1. Ramais de sucção (a) e descarga (b) das bombas alternativas *Lufkin-Gaso*.

## 2. MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E PULSAÇÃO DE PRESSÃO

As vibrações excessivas ocorriam nos ramais de sucção e descarga das sete bombas triplex alternativas que operam em paralelo a uma rotação de aproximadamente 200 rpm. A pressão de sucção destas bombas situa-se entre 3,7 e 4,0 Kgf / cm<sup>2</sup>, enquanto que a pressão de descarga varia de 18 a 35 Kgf / cm<sup>2</sup>.

Foram realizadas medições de vibração e pulsação de pressão em vários pontos dos ramais de sucção e descarga. Os resultados foram obtidos utilizando acelerômetros e transdutores de pressão

piezelétricos e o analisador de sinais dinâmicos HP 35670A. Para avaliação das amplitudes de vibração foram utilizados critérios baseados nas amplitudes dos deslocamentos e velocidades máximas observados nas tubulações. O critério baseado nos deslocamentos estabelece limites de amplitudes de deslocamento pico a pico (p-p) em função da frequência de vibração, conforme mostra a Fig. (2) (Nimitz e Walter, 1974).

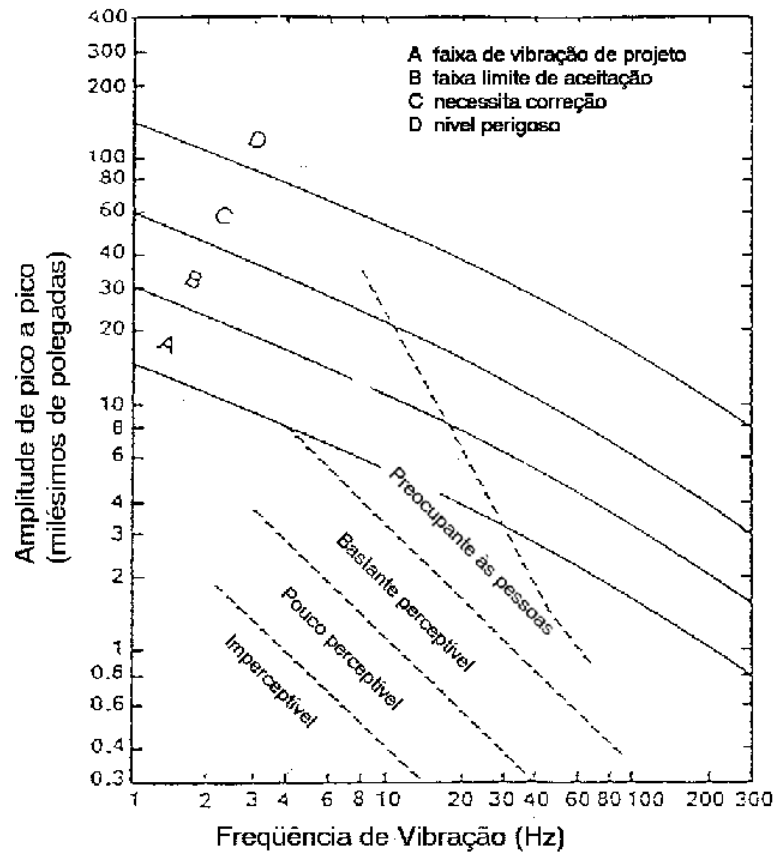


Figura 2. Critério da amplitude de deslocamento.

O critério da velocidade, apresentado na Tab. (1), é baseado na velocidade de 0 a pico medida no centro do vão entre suportes da tubulação e foi proposto por Maten (1984).

Tabela 1. Critério baseado na velocidade.

Nível de severidade	Velocidade	
	pol/s	m/s
Aceitável	0,6	0,015
Pouco severo a severo (requer correção)	0,6 a 1,5	0,015 a 0,038
Muito severo (perigoso – considerar parada )	1,5 a 3,0	0,038 a 0,076

Nas análises iniciais foram detectados elevados níveis de vibração conforme mostra por exemplo a Fig. (3). De acordo com os critérios utilizados, os níveis de vibração apresentados pelas tubulações não são permitidos.

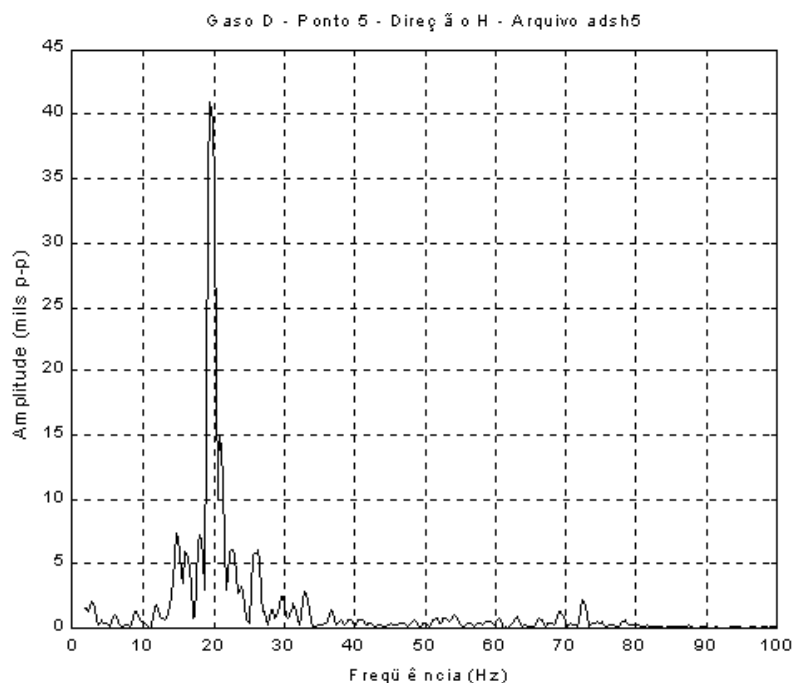


Figura 3. Amplitude de vibração na tubulação da bomba Gaso D em milésimos de polegada (mils).

Para avaliação da pulsação de pressão, foram utilizados os limites recomendados pela norma API 674 (1995). A Figura (4) mostra uma comparação entre as pulsações de pressão na descarga de uma das bombas alternativas com os limites propostos pela API 674 (1995).

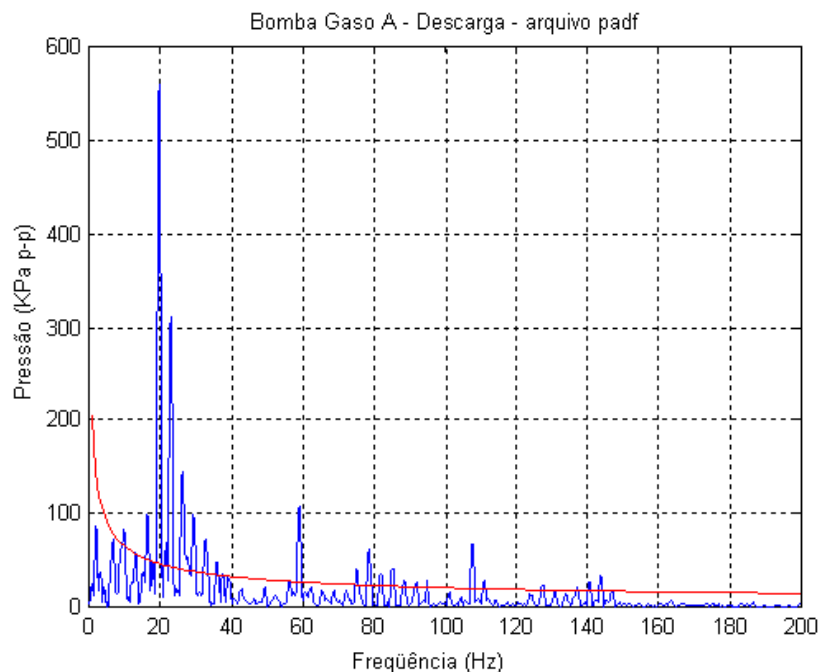


Figura 4. Pulsações de pressão na descarga da bomba Gaso A.

Nota-se que as amplitudes de pulsação de pressão superam em muito os limites recomendados. Este comportamento foi identificado em todas as bombas alternativas, tanto na descarga quanto na sucção.

### 3. SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE TUBULAÇÕES

Para identificar as causa dos elevados níveis de vibração e pulsação de pressão encontrados tanto nos ramais de descarga como nos ramais de sucção, foram realizadas análises acústicas destes ramais. Um modelo utilizando matrizes de transferência, construídas com base na hipótese de propagação de ondas planas foi desenvolvido para este fim (Kinsler *et al*, 1982 e To, 1984). Neste modelo, o sistema de tubulações é representado por uma combinação de elementos acústicos discretos interconectados, de forma que a pressão e a velocidade do fluido em uma seção apresenta uma única relação com a pressão e a velocidade numa outra seção. A formulação dos vários elementos acústicos é feita com base na conservação de massa e continuidade de pressão acústica. A aplicação dos vários elementos acústicos entre duas seções resulta em uma matriz de transferência relacionando a pressão acústica e a velocidade nestas duas seções. Por exemplo, para os elementos em série apresentados esquematicamente a Fig. (5), obtém-se a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} v_2^+ \\ p_2^+ \end{bmatrix} = I_{2/3} T_2(L_2) I_{1/2} T_1(L_1) \begin{bmatrix} v_0 \\ p_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde as matrizes  $T_1$  e  $T_2$  são matrizes de transferência dos trechos  $L_1$  e  $L_2$  respectivamente, e as matrizes  $I_{1/2}$  e  $I_{2/3}$  são matrizes de transição entre os trechos  $L_1$  e  $L_2$  e os trechos  $L_2$  e  $L_3$ , respectivamente.

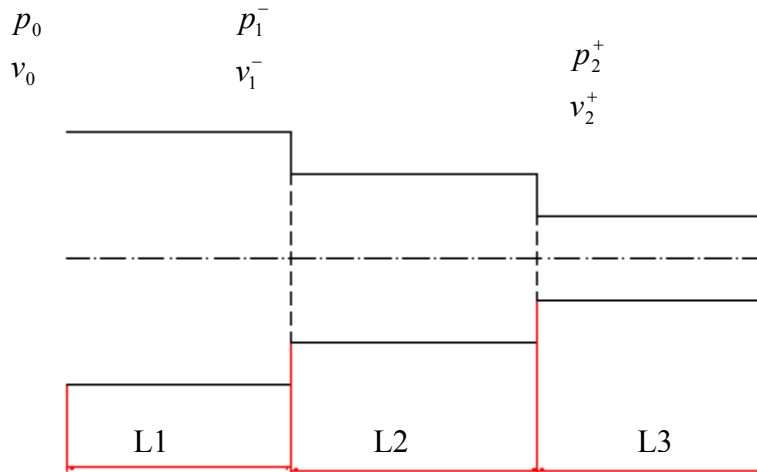


Figura 5. Representação de elementos acústicos de uma tubulação conectados em série.

Para obter as frequências naturais acústicas das tubulações, foram realizadas simulações da resposta em frequência da pressão nos ramais de descarga e sucção. A Figura (6) mostra por exemplo a resposta em frequência da pressão na tubulação de descarga da bomba Gaso A, do trecho compreendido entre o flange de descarga da bomba e o *Header*. A Figura (7) mostra a resposta em frequência da pressão de descarga nos ramais das bombas Gaso C, D e G, do trecho compreendido entre o flange de descarga da bomba e o *Header*. Note na Fig. (1) que estas três bombas possuem a mesma geometria da tubulação de descarga no trecho entre o flange de descarga da bomba e o *Header*.

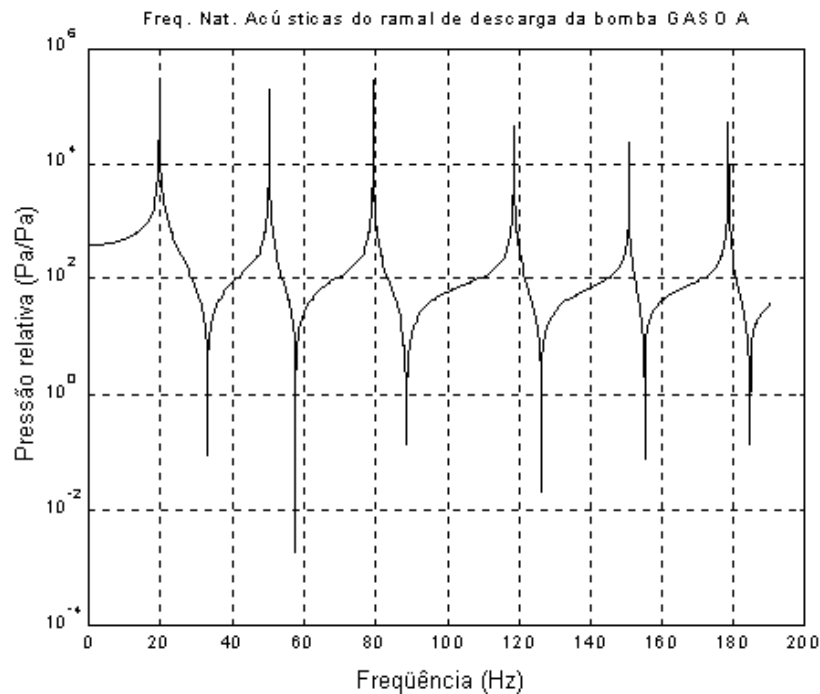


Figura 6. Resposta em frequência da pressão na tubulação de descarga da bomba Gaso A.

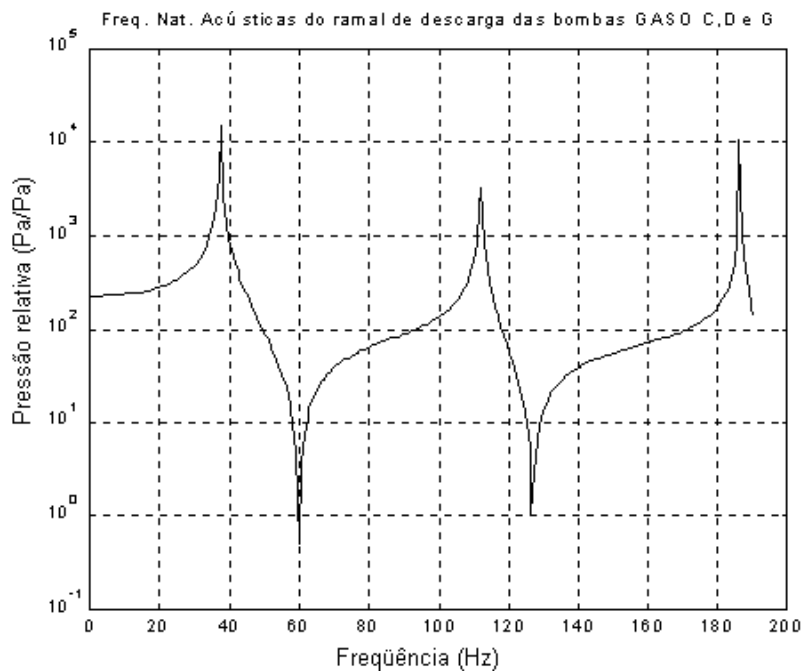


Figura 7. Resposta em frequência da pressão na tubulação de descarga das bombas Gaso C, D e G.

A comparação entre as frequências naturais acústicas das tubulações com as frequências em que ocorrem as amplitudes de pulsação de pressão mais elevadas permitiu concluir que ressonâncias acústicas são as principais responsáveis pelos elevados níveis de pulsação de pressão. A Tabela (2) mostra a comparação entre a frequência da componente da pulsação de pressão com amplitude mais elevada nos ramos de sucção e descarga, obtida através de medições, com a primeira frequência natural acústica determinada nas simulações. Note também na Fig. (6), que a primeira frequência

natural acústica é de aproximadamente 20 Hz, que coincide justamente com a frequência em que ocorre a amplitude máxima de pulsação de pressão observada nas medições de pressão na descarga desta bomba (Fig. 4).

Tabela 2. Comparação entre o resultado das medições de pressão e das simulações acústicas.

BOMBA	RAMAL	Frequência da maior amplitude de pulsação (Hz)	Primeira frequência natural acústica (Hz)
Gaso A	Descarga	19,5	20,3
Gaso B	Descarga	37,5	37
Gaso C	Descarga	37	37
Gaso D	Descarga	39,5	37
Gaso C	Sucção	37,5	38

As pulsações de pressão podem gerar forças dinâmicas de excitação em trechos da tubulação como curvas e joelhos, reduções e junções com tanques e vasos, conforme mostra esquematicamente a Fig. (8), para o caso de curvas e reduções. As forças dinâmicas provenientes do acoplamento entre as pulsações de pressão e a tubulação foram então consideradas como a principal fonte de vibrações.

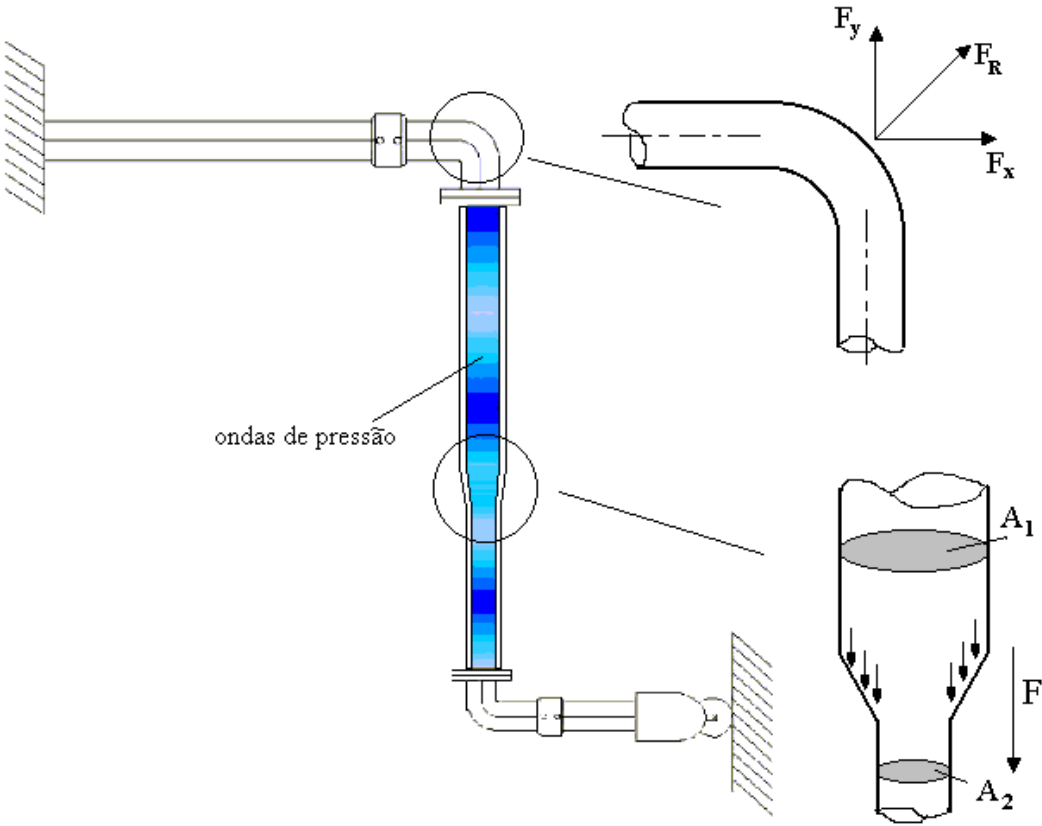


Figura 8. Forças dinâmicas em curvas e reduções de uma tubulação devido às pulsações de pressão.

## 4. CONCLUSÕES

Verificou-se que os ramais de descarga e os ramais de sucção possuem frequências naturais acústicas numa faixa de frequências onde ocorrem importantes harmônicos da rotação das bombas alternativas, o que contribui significativamente para os elevados níveis de pulsação de pressão. Os suportes instalados e os dispositivos de fixação das tubulações dos ramais de sucção e descarga não se mostraram eficientes, persistindo os altos níveis de vibração. A solução ideal para o problema é a instalação de filtros acústicos na sucção e na descarga das bombas (Lin, 1996), entretanto sua implementação requer investimentos elevados. Como opção mais simples e econômica, recomendou-se variar a velocidade de rotação das bombas GASO para tentar evitar a condição de ressonância acústica nos ramais de sucção e descarga. Se condições de operação mais amenas forem observadas, a utilização dos amortecedores de pulsação, atualmente inoperantes, pode ser viável, pois a falha prematura de suas bexigas devem estar ocorrendo devido aos elevados níveis de pulsação de pressão provocados por ressonâncias acústicas.

A mudança de encaminhamento das tubulações de sucção ligando as bombas alternativas ao *header* de sucção, conforme mostra a Fig. (9), já implementadas em alguns ramais, eliminou a ocorrência de falhas por fadiga na junção com o *header*.

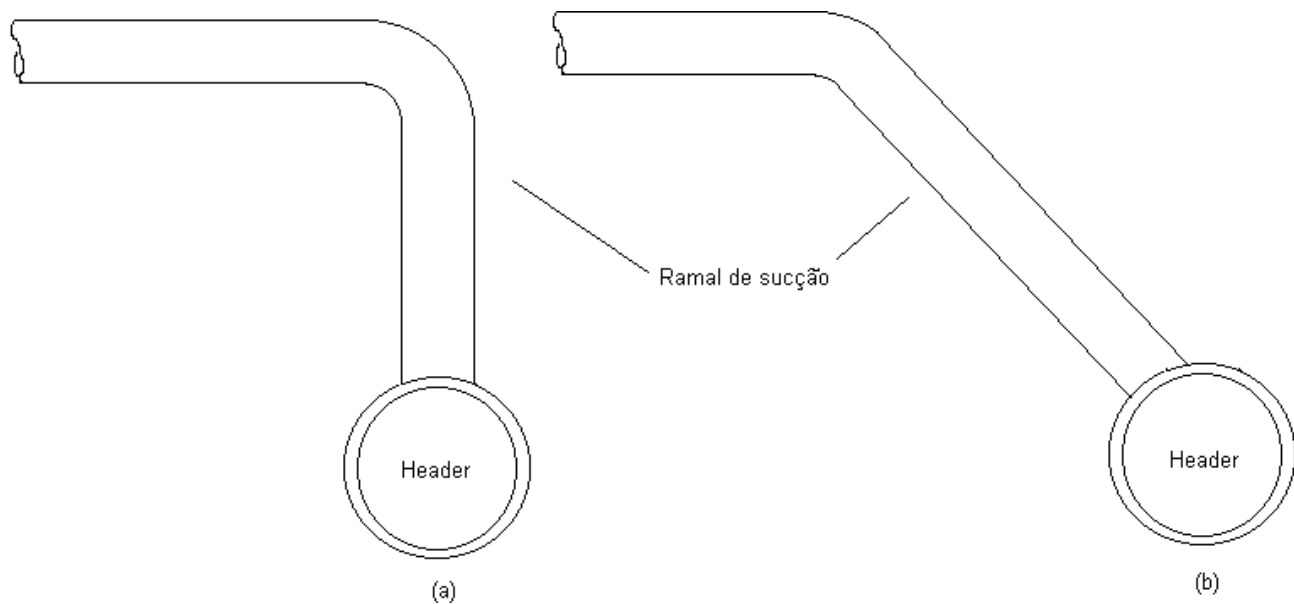


Figura 9. Alteração da geometria dos ramais de sucção para reduzir as tensões na união com o *header*: (a) geometria inicial, (b) geometria atual.

## 5. REFERÊNCIAS

API Standard 674 Second Edition, June 1995.

Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders, J.V., 1982, Fundamentals of Acoustics, Third Edition.

Lin, C.W., 1996, "Design Guide to Reduce Potential for Vibration Caused by Fluid Flow Inside Pipes - Review and Survey", Welding Research Council, boletim 417, Nova Iorque, EUA,.

Maten, S., 1984, "Field Criteria for Pipe Vibration", Hydrocarbon Processing.



- To, C.W.S., 1984, "The Acoustic Simulation and Analysis of Complicated Reciprocating Compressor Piping Systems, I: Analysis Technique and Parameter Matrices of Acoustic Elements", Journal of Sound and Vibration, 96(2), pp. 175-184.
- Von Nimitz, Walter W., 1974, "Reliability and Performance Assurance in the Design of Reciprocating Compressor and Pump Installations" Proceeding of the 1974 Purdue Compressor Technology Conference.
- Wachel, J. C., 1981, "Piping Vibration and Stress", Vibration Institute Machinery Vibration and Analysis Seminar, Nova Orleans, pp. 1-20.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### ANALYSIS OF VIBRATION AND PRESSURE PULSATION ON AN OIL PIPELINE PUMP STATION

**Antonio Lopes Gama**

Universidade Federal Fluminense, Dep. de Eng. Mecânica, 24210-000, Niterói, RJ, Brasil  
[agama@mec.uff.br](mailto:agama@mec.uff.br)

**Ediberto Bastos Tinoco**

PETROBRAS / CENPES, Engenharia Básica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
[ediberto@cenpes.petrobras.com.br](mailto:ediberto@cenpes.petrobras.com.br)

**João Bernardo da Gama Oberg**

Universidade Federal Fluminense, Dep. de Eng. Mecânica, 24210-000, Niterói, RJ, Brasil  
[bernardo\\_oberg@yahoo.com.br](mailto:bernardo_oberg@yahoo.com.br)

**Abstract.** *This paper presents the results of an experimental and numerical investigation of vibration problems on an oil pipeline pump station of PETROBRAS. Measurement of acceleration and pressure were performed in many points of the suction and discharge of the reciprocating triplex pumps. An acoustical analysis of the suction and discharge system of reciprocating pumps was made using a model based on the propagation of acoustic plane waves. The results were compared with the pressure pulsation measured in the piping system and it was concluded that an acoustical resonance was the cause of the excessive vibration. Recommendations to eliminate the vibration problems are also proposed.*

**Keywords.** *Piping, vibration, pressure pulsation*