

TIAGO BRENNER

AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DO RUÍDO MOAN EM BOMBAS  
HIDRÁULICAS

Monografia apresentada ao  
Departamento de Engenharia Mecânica  
da Escola de Engenharia da  
Universidade Federal do Rio Grande  
do Sul, como parte dos requisitos para  
obtenção do diploma de Engenheiro  
Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Alberto Tamagna

Porto Alegre  
2003



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DO RUÍDO MOAN EM BOMBAS HIDRÁULICAS**

**TIAGO BRENNER**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. José Gerbase Filho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

***BANCA EXAMINADORA:***

Prof. Dr. ROGÉRIO MARCZAK  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. WALTER JESUS PAUCAR CASAS  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. PEDRO BARBOSA MELLO  
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre  
2003

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus familiares, Alexandre, Juliana e João Pedro, pela consideração e apoio nesta etapa,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Alberto Tamagna*,

e aos meus colegas e amigos Aridio Assman, Sandro Toxa Farina e Tiago Becker pela indispensável colaboração neste trabalho.

BRENNER, T. **Avaliação Quantitativa do Ruído Moan em Bombas Hidráulicas**. 2003. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

## **RESUMO**

Neste trabalho, os resultados de medições de nível de pressão sonora e amplitude de vibração de uma bomba de palhetas utilizada em sistemas de direção hidráulica são apresentados. As medições de ruído são realizadas dentro da cabine do veículo, e as medições de vibração feitas em três diferentes pontos da bomba, no tubo de descarga, na sucção e na carcaça, com a bomba acionada e em condições controladas de geração do ruído *moan* e depois desativada, sem a presença do ruído *moan*. A análise dos resultados é feita via espectros de potência dos parâmetros avaliados. Também é apresentado um estudo da oscilação de pressão na descarga de uma bomba de palhetas, retirado de uma referência. Os resultados mostram frequências características nos espectros de ruído que são relacionadas com a oscilação de pressão na descarga da bomba.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ruído, Bomba de Palhetas, Sistema de Direção Hidráulica, *Moan*, Oscilação de Pressão

BRENNER, T. **Quantitative Moan Noise Valuation of Hydraulic Pumps**. 2003. 20f. 1998. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

#### **ABSTRACT**

In this work, measurement results of sound pressure level and vibration amplitude of a vane pump used in hydraulic steering system are presented. Measurements of noise are performed inside the vehicle, and vibration measurements are made on three different points of the pump, discharge tube, suction port and framework, with the pump activated and on controlled conditions for moan noise generation and later deactivated, without the presence of the moan noise. Analysis of results are made with the help of power spectrums of the measured parameters. It is also shown a study of pressure oscillation at the pump discharge of a vane pump, taken from a reference. Results show characteristic frequencies on the noise power spectrum which are related to the pressure oscillations at the pump discharge.

**KEYWORDS:** Noise, Vane Pump, Hydraulic Steering System, Moan, Pressure Oscillation

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>7</b>
2.3	Características do ruído <i>moan</i>	7
2.4	Sistema de Direção Hidráulica	7
2.5	Bomba de Palhetas - Princípio de funcionamento	9
2.6	Pulsção da pressão de Descarga em bombas de palheta	9
2.6.1	Forma da Onda da Pulsção da Pressão de Descarga	10
2.6.2	Espectro da Pulsção da Pressão de Descarga	12
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE MEDIÇÃO</b>	<b>13</b>
3.3	Parâmetros avaliados	13
3.4	Condições necessárias para avaliação do <i>moan</i>	13
3.5	Instrumentação	14
3.6	Medição	14
3.6.1	Avaliação no Palio	14
3.6.2	Avaliação no Golf	15
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>22</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>23</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a necessidade, na indústria, do controle de qualidade dos produtos fornecidos, de maneira objetiva, ou seja, com avaliações controladas e imparciais, distantes da interferência seja do fornecedor como do cliente, estão sendo desenvolvidos recentemente métodos quantitativos, baseados em medições instrumentadas, para a avaliação de ruídos nos produtos em questão. O componente avaliado neste trabalho será a bomba de palhetas, utilizada no sistema de direção hidráulica. Este é um componente com características bastante problemáticas no que diz respeito à geração de ruído em um veículo, as quais são de ordens tanto funcionais quanto construtivas (Delphi, 1995). A bomba hidráulica gera, durante o processo de converter energia mecânica em energia no fluido, energia sonora em três formas: ruído gerado pelo ar (*airborne noise*), ruído gerado por elementos estruturais (*structureborne noise*) e ruído hidráulico (*fluidborne noise*). O ruído gerado pelo fluido provoca uma vibração na estrutura responsável pelo escoamento do fluido, como tubulação e válvulas de controle, e assim gera ruído audível. Estes ruídos gerados pela estrutura e pelo ar são consideráveis diante dos demais ruídos operacionais da bomba. (Kojima, 1984)

Entre os ruídos relacionados à bomba do sistema de direção hidráulica, o chamado “*moan*” é bastante característico, e motivo de preocupação para seus projetistas e engenheiros. A fim de se desenvolver uma metodologia para avaliação quantitativa deste parâmetro, é essencial caracterizá-lo vibroacústicamente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DO RUÍDO *MOAN*

É importante, no intuito de caracterizar um ruído quantitativamente, primeiramente defini-lo de maneira subjetiva, em função da percepção que um condutor do veículo possa ter do mesmo.

O ruído “*moan*” caracteriza-se por possuir um tom grave, contínuo, de baixa intensidade. É manifestado geralmente em manobras, quando o motorista esterça o volante da direção com o carro parado.

Situações anormais, tais como baixo nível de óleo, causando aeração no sistema ou mangueiras tocando a carroceria do veículo poderão criar um nível de ruído que venha a gerar reclamações (NE.0153-03, 1995).

### 2.4 SISTEMA DE DIREÇÃO HIDRÁULICA

A bomba utilizada no sistema de direção hidráulica de veículos automotores é uma bomba hidrostática, ou de deslocamento positivo, do tipo de palhetas. Sua característica de desenvolver altas pressões com vazões relativamente baixas torna as máquinas hidrostáticas praticamente as únicas utilizadas em sistemas hidráulicos (Linsingen, 2001). Têm a finalidade de proporcionar ao motorista dirigibilidade com o mínimo esforço e a máxima precisão. Em determinados casos esta assistência pode reduzir o esforço de dirigibilidade de veículos de passageiros em até 75%. O sistema em questão também reduz o número de giros do volante quando comparado com uma direção mecânica. (Delphi, 1995)

No intuito de orientar o leitor quanto ao posicionamento da bomba no sistema de direção hidráulica e também no automóvel, faz-se uma pequena explanação do assunto. O sistema consiste basicamente de um reservatório, uma bomba, um cilindro hidráulico e uma válvula direcional rotativa de centro aberto como está esquematizado na figura 2.1.

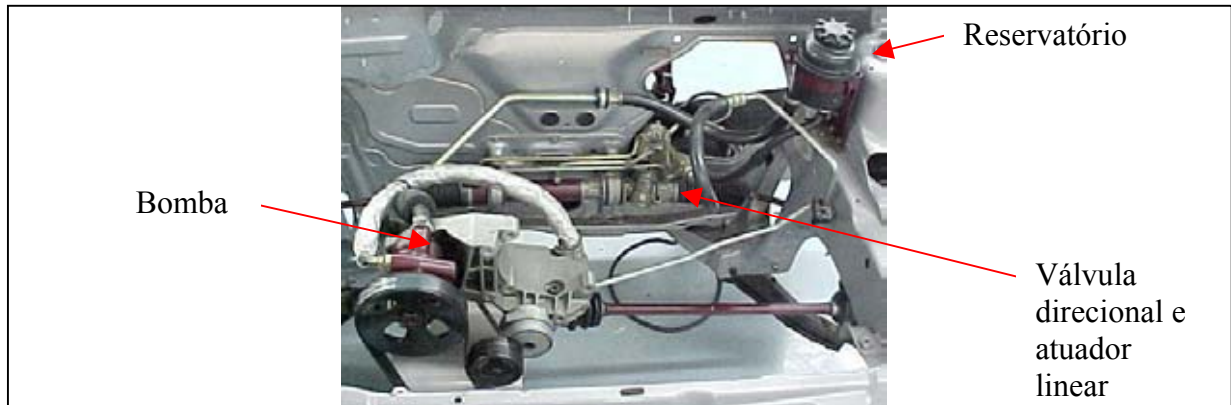


Figura 2.1 - Sistema de direção hidráulica

A bomba de palhetas é acionada por uma correia ligada à polia do motor, enviando óleo para o sistema. Sua rotação é proporcional a rotação do motor, a razão entre as polias não é a mesma para todos os modelos de veículos, mas geralmente se encontra próximo de 1:1. Esta, por sua vez é transmitida pelo eixo da polia ao rotor nele instalado. Tem como função gerar uma vazão controlada de óleo para o mecanismo de direção, como também controlar e manter a pressão no sistema. Em condições de alta rotação do motor, gera uma vazão além da considerada necessária, razão pela qual adota-se uma válvula reguladora de vazão na descarga da bomba, a qual permite à vazão alcançar um valor máximo, e partir deste, diminuir até alcançar um patamar satisfatório para determinada demanda. Nas bombas de deslocamento positivo, devido à estanqueidade entre as câmaras de entrada e saída, a vazão é pouco influenciada pela resistência normalmente oferecida ao escoamento a jusante (Linsingen, 2001). Isso implica em um aumento da pressão sem queda considerável da vazão. Assim, para evitar danos físicos ao sistema, se faz necessária a adoção de uma válvula de alívio de pressão para a bomba, localizada na descarga da bomba, que provoca uma recirculação do fluido dentro da mesma. Esta atua quando a pressão na mangueira de descarga da bomba alcança um valor determinado, provocado pela drástica diminuição fluxo de óleo na válvula rotacional quando esta tem sua rotação elevada pelo condutor. Esta condição é característica do fim de curso do volante, ou seja, quando se esterça o volante até seu limite, comum em manobras de estacionamento. Alguns componentes internos da bomba podem ser observados na figura 2.2.

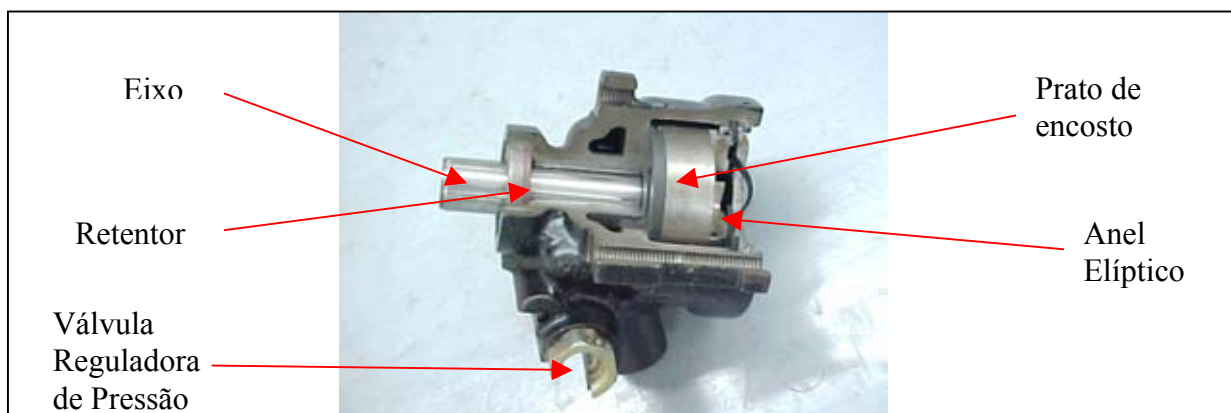


Figura 2.2 - Vista lateral da bomba em corte



## 2.5 BOMBA DE PALHETAS - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

As máquinas de palhetas são constituídas basicamente por um rotor cilíndrico com ranhuras onde se alojam palhetas retangulares móveis, sendo o conjunto montado dentro de um anel estator de geometria apropriada. O conjunto assim formado é montado numa carcaça com fechamento lateral por pratos. (Linsingen, 2001) Com o movimento rotativo, as palhetas são projetadas contra a superfície do anel estator por força centrífuga e pressão aplicada na base das palhetas. Assim, entre cada duas palhetas consecutivas, rotor e anel estator, são formadas as células de fluido. A entrada e saída de fluido ocorrem por meio de aberturas existentes nos pratos laterais, com comprimento angular suficiente para permitir toda a variação volumétrica das células. A bomba analisada possui duas câmaras de sucção e duas de descarga diametralmente opostas, criando com isto uma compensação entre as forças de pressão de mesma direção e grandeza, mas de sentidos opostos. Esta configuração a caracteriza com uma bomba balanceada. A vazão total é, para tal, determinada pela superposição das vazões dos dois lados da bomba. A separação entre as câmaras de entrada e saída é obtida deixando-se, entre as aberturas, um espaço equivalente à distância entre duas palhetas consecutivas. Nesse espaço, o estator deve possuir geometria tal que não permita variação volumétrica da célula, evitando assim que uma redução em volume provoque aumento excessivo de pressão interna na célula. O volume deslocado por rotação é constante, o que faz da bomba de palhetas em questão do tipo de deslocamento fixo. (Linsingen, 2001)

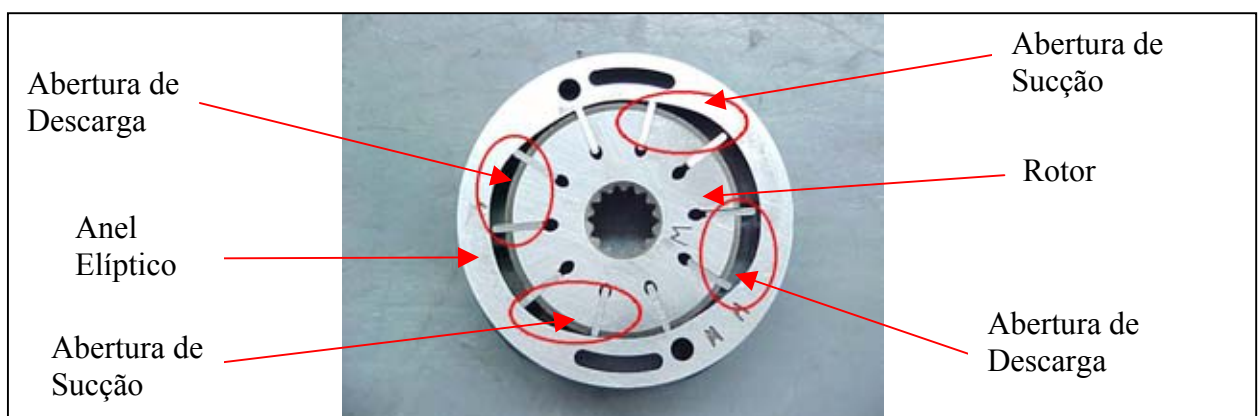


Figura 2.3 - Conjunto rotativo

Na região de aumento de volume a bomba tem sua região de sucção devido à baixa pressão formada, onde o óleo é obrigado a ocupar o volume da câmara. Em bombas balanceadas, um quarto de rotação adiante, ao atingir a região de diminuição de volume e pôr conseqüência o aumento de pressão, o óleo é obrigado a sair. Pode-se observar que ao final de cada rotação são efetuados dois ciclos completos. A figura 2.3 ilustra o conjunto rotativo da bomba de palhetas.

## 2.6 PULSAÇÃO DA PRESSÃO DE DESCARGA EM BOMBAS DE PALHETA

Em praticamente todos os tipos de bombas de deslocamento positivo, o comportamento da vazão é irregular, possuindo caráter pulsátil. O valor percentual da irregularidade é substancialmente afetado pelo número de células de transporte, o que, na bomba em questão são as palhetas. (Linsingen, 2001) Com esta pulsação da vazão, a descarga da bomba é submetida a uma flutuação de pressão diretamente proporcional.

A pulsação da pressão de descarga em uma bomba de palhetas apresenta três tipos distintos de oscilação de pressão, a **ondulação de pressão** (*pressure ripple, PR*), com sua

freqüência fundamental e suas harmônicas relacionadas à freqüência de passagem das palhetas pelo orifício de descarga da bomba. Sua principal causa é a ocorrência de um refluxo de óleo proveniente da câmara de descarga para a câmara de pressão, devido à compressibilidade do fluido. Acontece quando a célula de fluido passa pela abertura de descarga, daí a relação com a freqüência de passagem das pás próximo a elementos fixos, como a abertura de descarga. A freqüência de passagem de palhetas é determinada a partir da equação 1,

$$f_{Palhetas} = f_{PR} = N.z.r \quad (1)$$

onde N é a freqüência de rotação do rotor [Hz], z é o número de palhetas e r é a relação das polias do motor e da bomba do sistema de direção hidráulica.

A **oscilação de pressão de baixa freqüência** (*low-frequency pressure oscilation, LFPO*), com sua freqüência fundamental e suas harmônicas relacionadas à freqüência de rotação do rotor da bomba, tem sua causa na flutuação do refluxo de óleo na sucção da bomba, também relacionada à compressibilidade do fluido, em função da posição rotacional do rotor. Esta flutuação de pressão tem, no caso de bombas balanceadas, sua componente fundamental igual à freqüência de rotação do rotor multiplicada por dois, conforme equação 2,

$$f_{LFPO} = 2.N.r \quad (2)$$

A **oscilação de pressão transiente de alta freqüência** (*transient high-frequency pressure oscilation, THFPO*), relacionada também à freqüência de passagem das palhetas, porém verificada em apenas algumas harmônicas de ordem elevada, é provocada pela ressonância da coluna de fluido na câmara de descarga da bomba, em função do comprimento desta e do comprimento da onda da oscilação de pressão, mas também de características do sistema hidráulico, como sua impedância.

Para entender o fenômeno, apresenta-se a bomba analisada experimentalmente por Kojima, que é uma bomba de palheta balanceada, de deslocamento fixo, com doze palhetas, pressão de alívio de 15 MPa e seu deslocamento volumétrico é de 0,00804 m<sup>3</sup>/s. Foram usados, a fim de comparação, dois pratos de encosto na bomba, um com rasgos de alívio e outro sem. É nos pratos de encosto que ficam as aberturas para entrada e saída de fluido da câmara de pressão da bomba. Nos testes realizados, a freqüência de rotação do rotor (N) foi mantida em 1500 rpm (25 Hz). Como a bomba tem doze palhetas, a freqüência de passagem de pás pela abertura de descarga da bomba é de 300 Hz. Os parâmetros avaliados na referência foram a pressão de descarga e a variação desta, medidas através de um transdutor de pressão localizado na conexão entre a descarga da bomba e o tubo de descarga, e a pressão dentro da câmara de pressão da bomba, através de um transdutor localizado na face do rotor.

### 2.6.1 Forma da Onda da Pulsação da Pressão de Descarga

A forma da onda da pulsação da pressão de descarga da bomba mostra que a ondulação de pressão (PR) é superposta à oscilação de pressão de baixa freqüência (LFPO). A ondulação de pressão (PR) apresenta um período de 3,33 msec (f=300 Hz) e a oscilação de pressão de baixa freqüência (LFPO) um período de 40,0 msec (f=25 Hz). Estes estão coerentes com a afirmação de que uma está relacionada à freqüência de passagem de pás e a outra à freqüência do rotor. Outra característica apontada na curva de pulsação da pressão de descarga da bomba de palhetas, figura 2.4, é que ela não é similar a cada período da freqüência de passagem de

palhetas pelo orifício de descarga. Isto se dá em função do deslocamento axial das palhetas no rotor. Também é mostrado que a amplitude das duas ondas aumenta com a impedância do sistema, representada no artigo pelo diâmetro interno ( $D_i$ ) da mangueira de descarga da bomba e comprimento da mangueira de descarga, constante em todos os testes da referência, com 2,10 m.

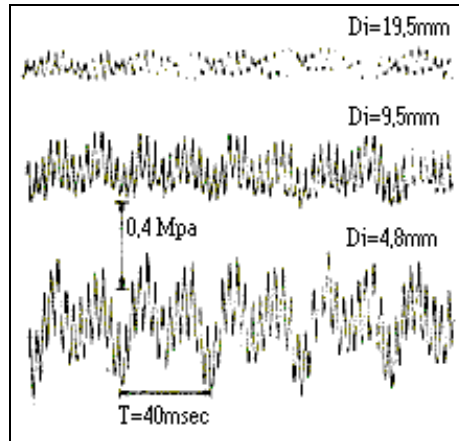


Figura 2.4 - Ondas de Pulsação da Pressão de Descarga, Kojima, 1984

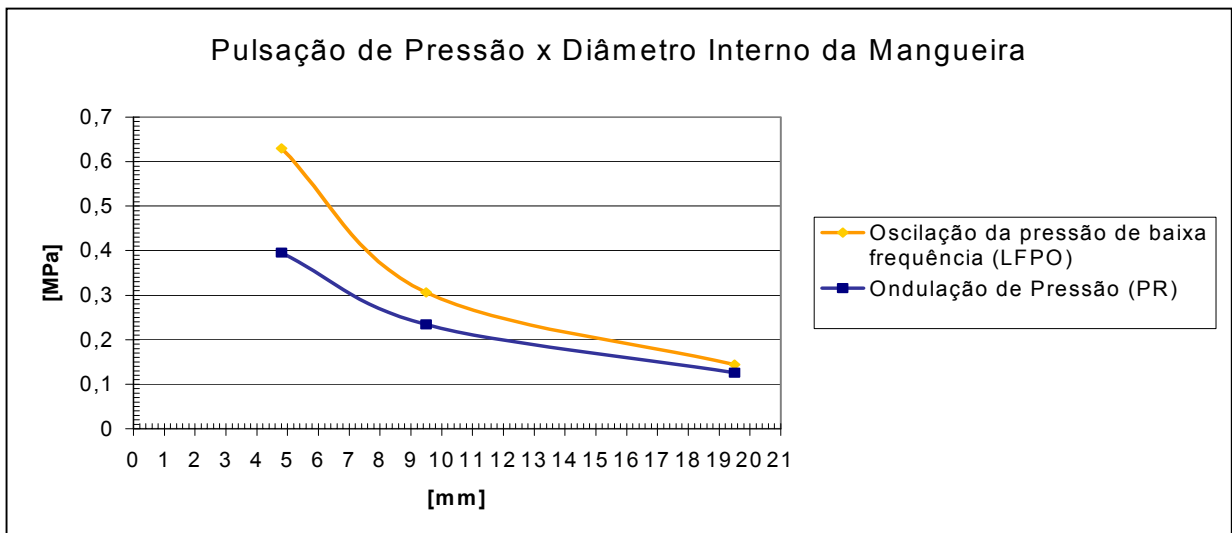


Figura 2.5 - Variação da Pulsação de Pressão com o diâmetro interno da mangueira de pressão

Aumentando o diâmetro interno da mangueira, tem-se uma diminuição na resistência ao escoamento, assim, uma diminuição da impedância. Para avaliar a quantitativamente a variação da amplitude da pulsação de pressão de baixa frequência, foram feitas medições para três diâmetros internos ( $D_i$ ) da mangueira de descarga, com 4,8 mm, 9,5 mm e 19,5 mm. O diâmetro interno das mangueiras de descarga utilizadas nos veículos avaliados no capítulo 3 deste trabalho são de 10 mm. A figura 2.5 mostra a relação entre a pulsação de pressão e o diâmetro interno da mangueira de pressão. As análises seguintes da referência foram realizadas somente com mangueiras de diâmetro de 4,8 mm, a fim de que os fenômenos em estudo sejam os mais pronunciados possíveis.

A transição de pressão na câmara de pressão mostra que a oscilação de pressão transiente de alta frequência (*THFPO*) aparece no momento em que a pressão aumenta de zero até um valor um pouco acima da pressão de descarga, por um breve instante. Isto acontece no momento em que a célula de transporte enche-se de fluido, ao passar pela

abertura de sucção. O período de 10,2 msec é o tempo em que a célula de transporte mantém sua pressão máxima (pressão de descarga), no maior diâmetro do anel elíptico, até passar pela abertura de descarga, quando sua pressão atinge o valor mínimo. Verificou-se, na comparação entre a bomba com prato de pressão com e sem rasgos de alívio, que a oscilação de pressão transiente de alta frequência (*THFPO*) é mais expressiva na bomba montada com prato sem rasgos de alívio, mostrado nas figuras 2.6 e 2.7. É afirmado que os rasgos de alívio são efetivos na redução harmônicas de ordem elevada da ondulação de pressão (*PR*) e da oscilação de pressão transiente de alta frequência (*THFPO*). As análises posteriores serão representativas somente para a bomba sem rasgos de alívio.

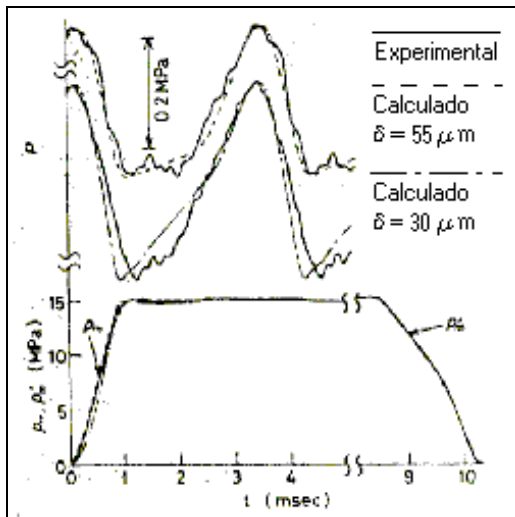


Figura 2.6 - Período da ondulação de pressão (*PR*) – prato de encosto com rasgos de alívio, Kojima, 1984

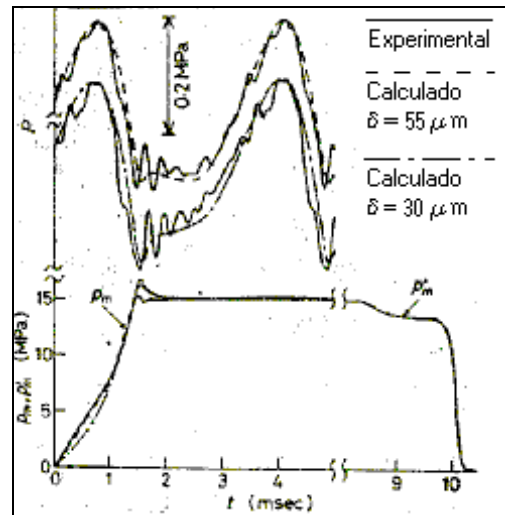


Figura 2.7 - Período da ondulação de pressão (*PR*) – prato de encosto sem rasgos de alívio, Kojima, 1984

### 2.6.2 Espectro da Pulsação da Pressão de Descarga

A amplitude das harmônicas da ondulação de pressão (*PR*) diminui continuamente com o aumento da ordem da componente harmônica, tendo sua componente fundamental com 307 Hz, segunda com 615 Hz e assim sucessivamente. Este comportamento ocorre até a 9ª componente harmônica, desta até a 13ª a amplitude tem um aumento seguido de um decréscimo. É nesta faixa de frequências que se manifesta a oscilação de pressão transiente de alta frequência (*THFPO*) na bomba analisada na referência.

Já a oscilação de pressão de baixa frequência (*LFPO*) apresenta sua primeira componente harmônica em 50 Hz, sua segunda em 100 Hz e assim sucessivamente. Assim como no espectro da ondulação de pressão, esta também apresenta uma diminuição constante na amplitude das harmônicas, a partir de sua componente fundamental, a qual alcança aproximadamente o mesmo valor da componente fundamental da ondulação de pressão (*PR*). O espectro da pulsação da pressão de descarga é mostrado na figura 2.8.

Os resultados referentes à pulsação da pressão de descarga de bombas de palhetas apresentados por Kojima, 1984, serão utilizados na análise dos resultados das avaliações de ruído e vibração realizados nos sistemas de direção hidráulica equipados com bombas similares, buscando verificar uma relação entre esta pulsação de pressão e o ruído *moan*.

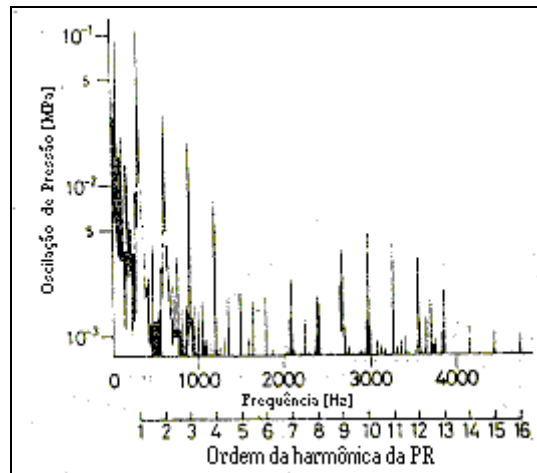


Figura 2.8 – Espectro da pulsação da pressão de descarga, Kojima, 1984

### 3 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

No presente trabalho são apresentados medições de ruído e vibração provenientes de bombas de palhetas, realizadas em duas situações, com o sistema de direção hidráulica em condição de geração do ruído *moan*, e sem a presença deste ruído. Os resultados destas medições são comparados e analisados, visando identificar frequências características e explicações para suas causas.

#### 3.3 PARÂMETROS AVALIADOS

O processo de caracterização de um ruído exige o conhecimento quantitativo de determinados parâmetros que expressam seu comportamento. Definiu-se como objetivo definir níveis de pressão sonora dentro do habitáculo do automóvel, simulando a percepção de um ocupante do mesmo, paralelamente à amplitude de vibração da bomba hidráulica, para que, a partir disto, através de uma análise dos dados avaliados, definir frequências características nas quais o ruído *moan* se manifesta.

#### 3.4 CONDIÇÕES NECESSÁRIAS PARA AVALIAÇÃO DO *MOAN*

Segundo o fabricante de bombas de palheta para o sistema de direção hidráulica, alguns requisitos são necessários para obter-se um resultado padronizado das avaliações. Parâmetros como nível de óleo, calibragem dos pneus e tensão da correia fora do recomendado interferem no resultado dos testes, além disso o piso no qual efetuar-se-á a avaliação deve ser tal que provoque mínima geração de ruído dos pneus em contato com este. Desta forma procura-se evitar problemas como a presença de ar no sistema hidráulico, esforço desnecessário do sistema, etc. Além disto, a temperatura do óleo é especificada como aproximadamente 76°C. (NE.0135-03)

Com o sistema sob condições controladas, parte-se para o procedimento de avaliação do ruído *moan*. Neste, com o veículo em marcha lenta, em ponto morto, rotação do motor em torno de 850 rpm (14,17 Hz), esterça-se o volante lentamente para ambos os lados, sem alcançar o fim de curso. Este procedimento provoca uma solicitação do mecanismo de direção à bomba hidráulica, a qual tem sua pressão de descarga aumentada. Esta variação no regime da bomba provocando uma alteração da rotação desta, e por conseqüência do motor.

### 3.5 INSTRUMENTAÇÃO

Foram utilizados os seguintes instrumentos nas medições.

- Acelerômetro de transdutor piezoelétrico com ponta de prova (Brüel & Kjaer)
- Condicionador de sinal (Gmap)
- Medidor de nível de pressão sonora (Quest 2800)
- Amplificador (para o sinal sonoro) (Gmap)
- Placa de aquisição de dados A/D 12 bits (Computer Board)
- Software para tratamento dos dados (Catman, HP Vee)
- Termômetro Incoterm (-10°C a 250°C)
- Cabos

### 3.6 MEDIÇÃO

Foram realizadas medições em dois veículos, um Fiat Palio ELX 1.3 16V, modelo 2001 e um VW Golf 1.6, também modelo 2001. As bombas da direção hidráulica de cada veículo são de fabricantes distintos, porém ambas com dez palhetas. As medições foram realizadas no mesmo local, o estacionamento interno, localizado atrás do prédio da engenharia mecânica da UFRGS, em diferentes dias, mas com mesma temperatura média de 18°C em ambos os dias. O piso no local da medição era de cimento, a temperatura do óleo do sistema de direção hidráulica foi mantida, em ambos os testes, na faixa de 55°C a 65 °C, tendo sido o termômetro colocado dentro do reservatório de óleo do sistema. O medidor de nível de pressão sonora utilizado nas medições foi um *Quest 2800*. O posicionamento deste foi escolhido de forma a simular a posição do passageiro sentado no banco da frente do veículo. O instrumento utilizado para medir a aceleração, em função da dificuldade de acesso aos pontos de medição, foi um acelerômetro piezoelétrico com ponta de prova. A rotação do motor foi controlada pelo conta-giros do veículo. A tensão da correia da bomba hidráulica não foi verificada.

A precisão da frequência dos sinais foi de 0,2 Hz, para uma taxa de aquisição de dados de 44100 Hz e um tempo de aquisição de 5 s. Quanto à amplitude dos sinais, o medidor de nível de pressão sonora apresenta um erro de 0,5 dB. Sua calibração foi realizada captando um sinal de amplitude conhecida e frequência de 1000 Hz, gerado a partir de um gerador de sinal. Com isso, ajustou-se o medidor de nível de pressão sonora para a amplitude do sinal emitido. Visto que o objetivo das medições foi determinar frequências características dos sinais, a determinação das amplitudes dos mesmos com alta precisão não foi motivo de preocupação.

#### 3.6.1 Avaliação no Palio

Na avaliação no Palio, primeiramente foram efetuadas medições de pressão sonora, paralelamente a medições da vibração com a bomba acionada, mantendo a condição do sistema favorável ao surgimento do ruído *moan*. A vibração foi medida em três pontos não simultâneos da bomba de direção hidráulica: ao lado do tubo de sucção, na altura da câmara de pressão da bomba e no tubo de pressão, a aproximadamente 10,0 mm da saída da bomba, como mostra a figura 3.2. Posteriormente, a bomba foi desativada, retirando-se a correia de sua polia, e as mesmas medições de nível de pressão sonora e vibração foram realizadas, nos mesmos pontos, buscando assim identificar características vibroacústicas do veículo sem a interferência da bomba hidráulica. A medição de cada ponto foi executada duas vezes, uma imediatamente após a outra, para com isso verificar a repetibilidade do evento. Foi

determinado linear o circuito de compensação na avaliação do Pálio, o que permite ao sinal ser transmitido sem qualquer alteração.

### 3.6.2 Avaliação no Golf

A avaliação no Golf teve algumas diferenças em relação à do Pálio. Este veículo possui apenas uma correia para todo o trem de polias, o que impediu que a bomba fosse desativada. Dessa forma, foram realizadas medições com a bomba solicitada, ou seja, estercando o volante lentamente com o carro em marcha lenta, condição na qual é verificado o ruído *moan*, e com a bomba em baixa pressão, sem movimentar o volante. Além disso, a figura 3.1 mostra que o posicionamento da bomba permitiu somente a medição da vibração no tubo de pressão desta, pois este era o único ponto acessível. Ainda, a fim de captar um sinal sonoro com qualidade para ser audível em posterior reprodução, foi utilizado um amplificador (5x) para este sinal, e o circuito de compensação do medidor de pressão sonora foi acertado em circuito A, o qual aproxima-se mais das curvas de igual audibilidade do ouvido humano para baixos níveis de pressão sonora.

É importante registrar que na avaliação do automóvel Pálio, foi necessário manter uma fresta na janela para a passagem do cabo do medidor de nível de pressão sonora. Já na avaliação do Golf, todas as janelas estavam fechadas.



Figura 3.1 - Posicionamento do acelerômetro na bomba do Golf.

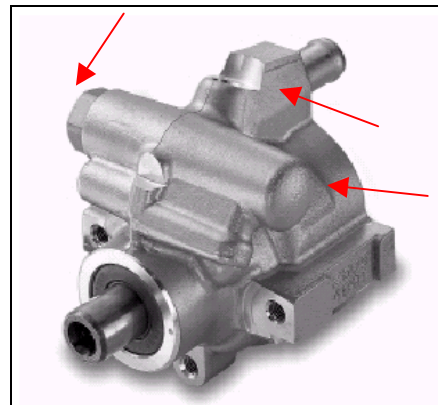


Figura 3.2 - Posicionamento do acelerômetro na bomba do Pálio.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

As medições realizadas geraram sinais de ruído e vibração em função do tempo. Para se efetuar uma análise em domínio frequência, se faz necessária a obtenção do Espectro de Potência dos sinais. A conversão dos sinais de vibração foi feita dividindo os valores de tensão [V] obtidos por um fator de 0,089 V/g, fornecido no manual do acelerômetro, para obter assim uma escala em [g]. Já a conversão do sinal de ruído se deu em duas etapas. O instrumento tem capacidade para adquirir o sinal em faixas de 60 dB, então, em função do ruído avaliado, pode-se escolher entre 20-80 dB, 40-100 dB, 60-120 dB ou 80-140 dB. Sua saída fornece um sinal de tensão alternada [V], com tensão mínima de 0,00316 e máxima de 3,16 V. Com o uso da fórmula 3, converte-se o sinal de [V] para [dB].

$$NPS = dB_{min} + 20 \log_{10} \left( \frac{V}{V_0} \right) \quad (3)$$



onde NPS é o nível de pressão sonora em [dB],  $dB_{\min}$  é o valor mínimo da faixa de 60 dB escolhida para medição,  $V$  é o valor de tensão medido e  $V_0$  é a tensão mínima do sinal fornecido pelo instrumento, no caso 0,00316 V.

Os sinais de ruído foram representados em três diferentes faixas de frequências, de 0 a 500 Hz, 0 a 1000 Hz e 0 a 5000 Hz. Isto facilita a visualização das frequências características do *moan*. Já os de vibração foram limitados a 1000 Hz em função do acelerômetro ter sido operado manualmente. Após o tratamento dos dados, fez-se uma comparação dos sinais com a bomba acionada e bomba desativada, além disso, buscou-se uma correlação entre os sinais de ruído captados dentro da cabine do veículo e os de vibração da bomba.

Algumas características foram claramente evidenciadas em todos os sinais obtidos. A frequência de rotação do motor e suas componentes harmônicas sempre puderam ser consistentemente determinadas. Esta apresentou maior amplitude sempre na primeira frequência de vibração do motor, a qual é o dobro da frequência de rotação do motor para motores quatro cilindros em linha. (Bosch, 1996)

São apresentados a seguir os gráficos de ruído e vibração das análises realizadas nos automóveis Golf e Fiat Palio, com medições de vibração realizadas no tubo de pressão da bomba. Os gráficos das demais avaliações estão em anexo.

A figura 4.1 mostra o espectro de ruído do Golf com a bomba acionada e desativada. Está indicada no gráfico de ruído com a bomba desativada a frequência fundamental de vibração do motor, 25,9 Hz, juntamente com suas harmônicas. Estas frequências também aparecem pronunciadas no espectro de potência do Golf com a bomba acionada, sendo a frequência fundamental de 26,5 Hz. Esta diferença entre as duas frequências indica um pequeno aumento da rotação do motor quando a bomba solicita maior potência, caso em que se esterça o volante em marcha lenta. Outra desigualdade entre os dois gráficos é a presença de uma frequência fundamental em 35,5 Hz e suas componentes harmônicas no caso da bomba acionada. Isto pode estar relacionado à oscilação de pressão de baixa frequência (*LFPO*), que, segundo Kojima, 1984, é a pulsação de pressão relacionada à frequência de rotação do rotor da bomba. A tabela 1 mostra valores calculados para as frequências fundamentais e componentes harmônicas da ondulação de pressão (*PR*) e oscilação de pressão de baixa frequência (*LFPO*). Estes valores são semelhantes aos encontrados em picos existentes no gráfico de ruído com a bomba acionada e que não aparecem no caso da bomba desativada. Os resultados apresentados na tabela 1 foram calculados com uma relação de polias de 1:1,34 para o Golf. Não foi possível verificar esta relação na prática.

A figura 4.2 mostra os espectros de potência do ruído do Golf com a bomba acionada e desativada. Analisando o espectro na faixa de frequências entre aproximadamente 1300 e 2000 Hz vê-se um incremento nas amplitudes no caso da bomba acionada. É nas proximidades deste intervalo de frequência que manifesta-se, segundo Kojima, 1984, a oscilação de pressão transiente de alta frequência (*THFPO*). Nesta faixa de frequências encontram-se as componentes harmônicas de ordem 8, 9, 10 e 11 da ondulação de pressão (*PR*). Os espectros de potência do ruído do automóvel Palio apresentam níveis médios de pressão sonora um pouco maiores do que os do Golf, em parte devido ao fato já mencionado de ter-se mantido a janela do Palio um pouco aberta durante a avaliação, permitindo assim ao microfone captar um nível maior de ruído de fundo. Novamente, o nível médio de pressão sonora na faixa de frequência de 20 a 500 Hz é levemente mais alto na avaliação de ruído em presença do *moan*, principalmente nas frequências relacionadas a ondulação de pressão (*PR*) e oscilação de pressão de baixa frequência (*LFPO*). Isto pode ser verificado qualitativamente, na frequência de 137 Hz (1º componente da *PR*), a amplitude apresenta um incremento de aproximadamente 15 dB, e na frequência de 80,5 Hz (3º componente harmônica da *LFPO*), um incremento de 10 dB.



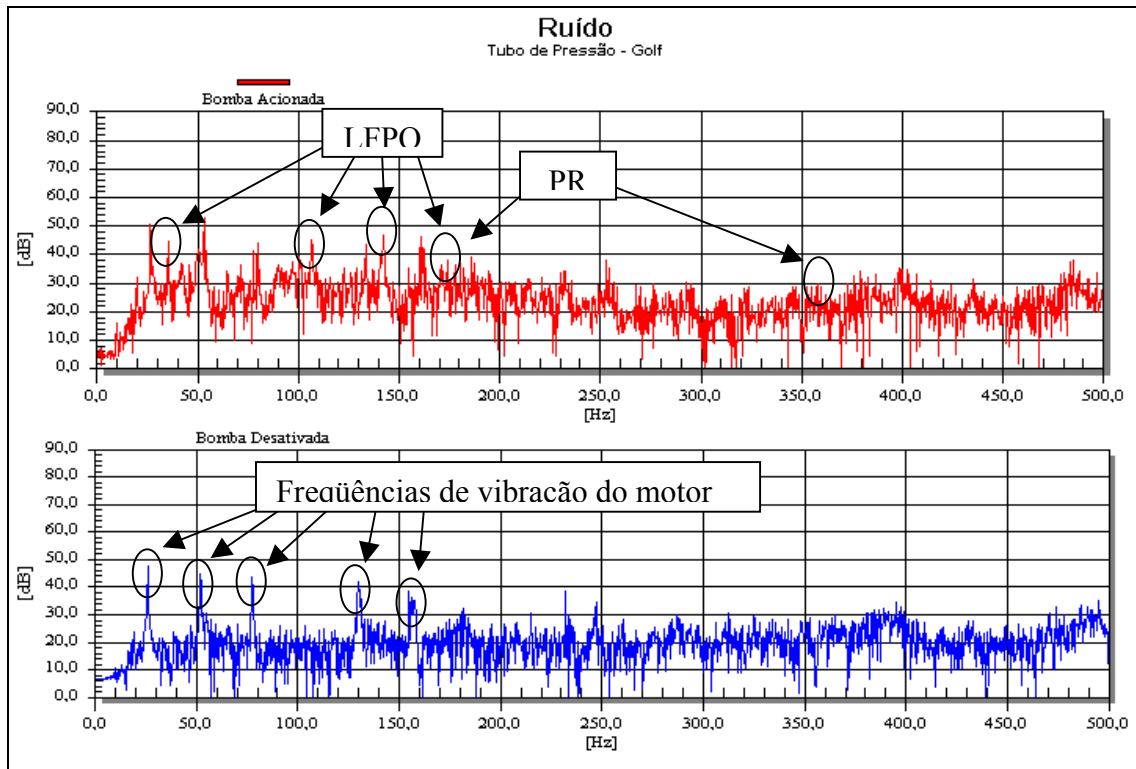


Figura 4.1 - Espectro de potência do Golf/Ruído - Bomba acionada (vermelho) e desativada (azul) – 0 a 500 Hz

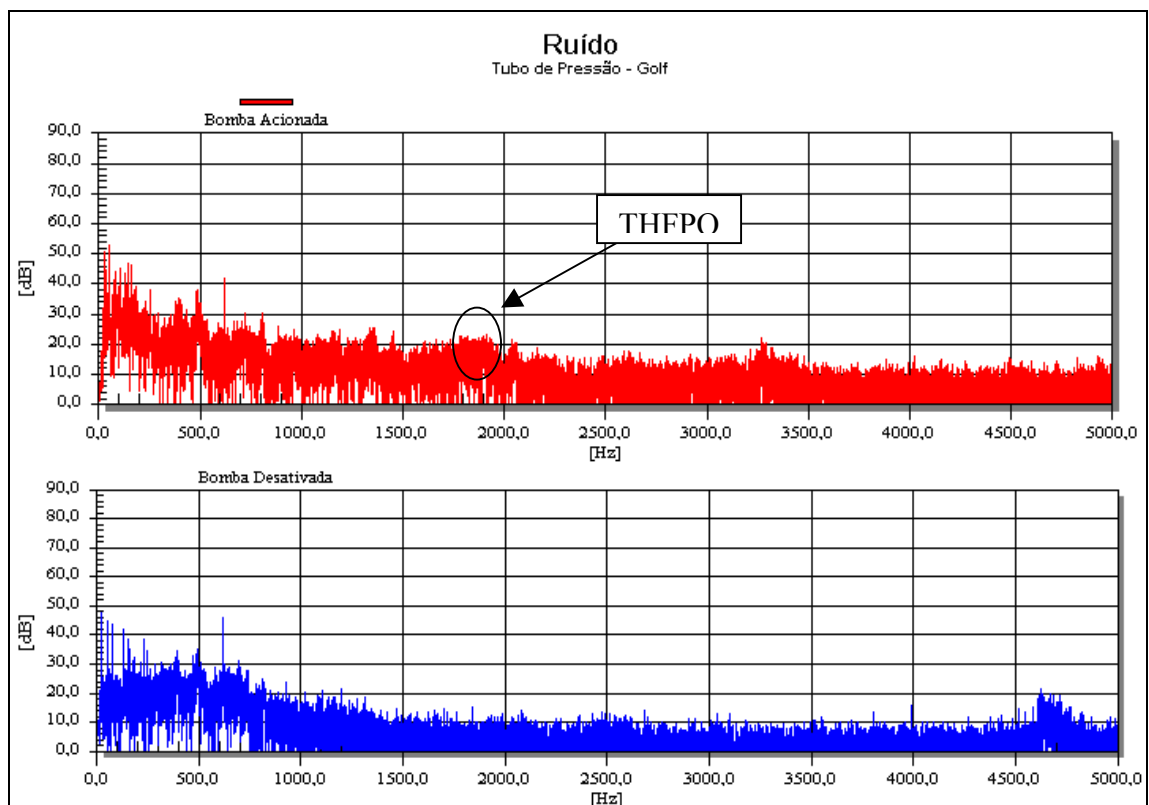


Figura 4.2 - Espectro de potência do Golf/Ruído - Bomba acionada (vermelho) e desativada (azul) – 0 a 5000 Hz

Tabela 1 - Frequências relacionadas à PR e LFPO – Ruído/Golf

Componente harmônica	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_{(PR)}$ [Hz]	176,2	352,5	528,7	704,9	881,1	1057,4	1233,6	1409,8
$f_{(LFPO)}$ [Hz]	35,5	71,0	106,5	142,0	177,6	213,1	248,6	284,1

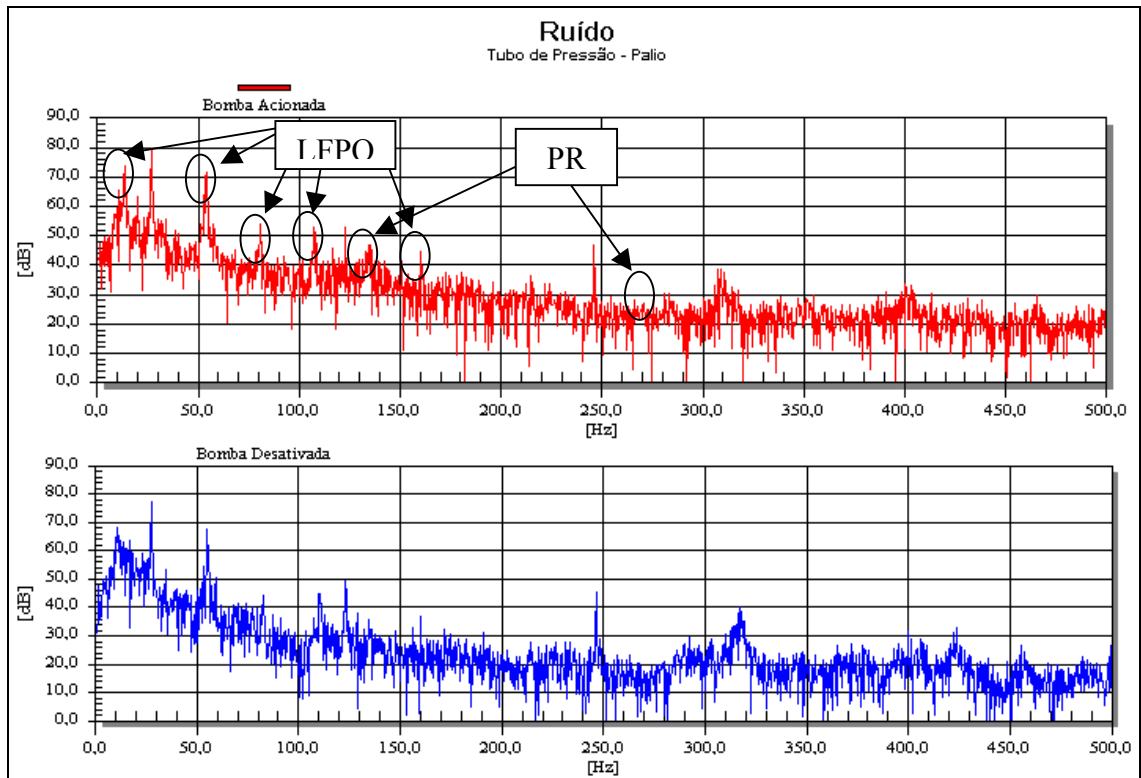


Figura 4.3 - Espectro de potência do Pailo/Ruído - Bomba acionada (vermelho) e desativada (azul) – 0 a 500 Hz

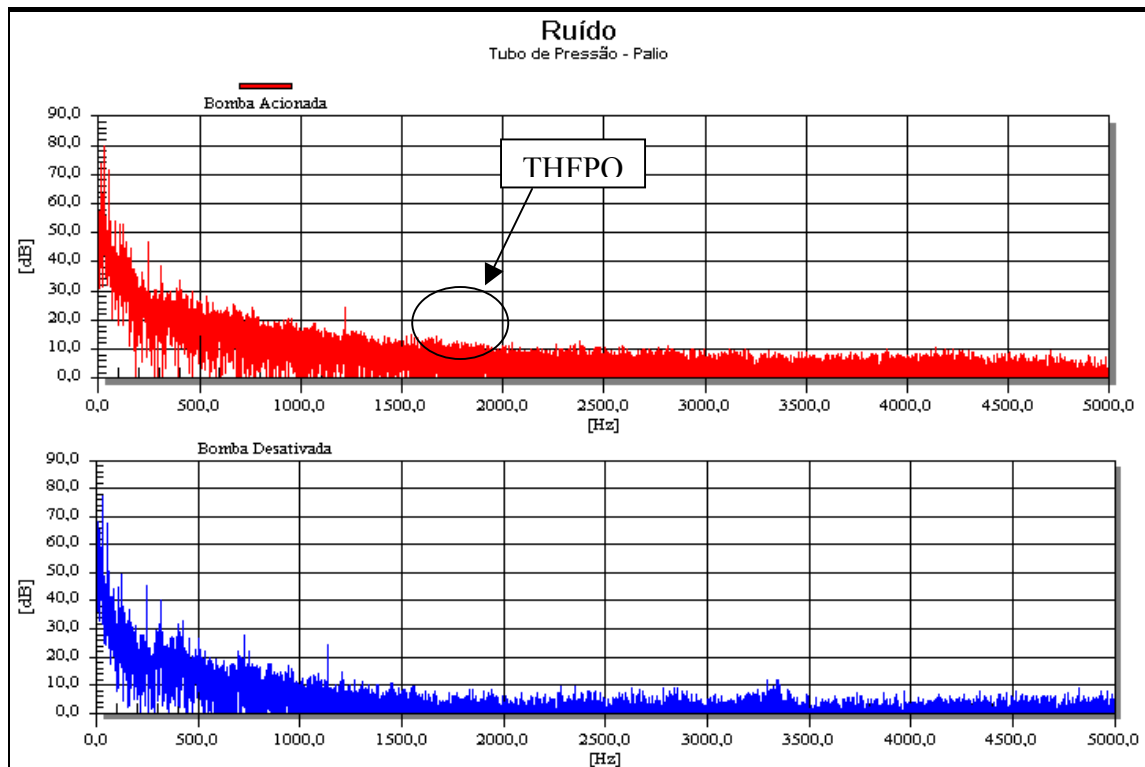


Figura 4.4 - Espectro de potência do Pailo/Ruído - Bomba acionada (vermelho) e desativada (azul) – 0 a 5000 Hz

Tabela 2 - Frequências relacionadas à PR e LFPO – Ruído/Pailo

Componente harmônica	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_{(PR)}$ [Hz]	137,2	274,4	411,6	548,8	686,0	823,1	960,3	1097,5
$f_{(LFPO)}$ [Hz]	27,4	54,9	82,3	109,8	137,2	164,6	192,1	219,5

Os valores apresentados na tabela 2 foram calculados para uma relação de polias de 1:1 no Pálio. (DHB-CA)

As medições de ruído com a bomba acionada e desativada mostraram diferenças mais significativas nas harmônicas de ordens inferiores. Foram calculadas as médias dos níveis de pressão sonora de cada avaliação na faixa de 20 a 500 Hz, e são apresentadas na tabela 3.

As curvas de vibração do Golf mostraram claramente os picos referentes à vibração do motor. No caso da bomba acionada, a frequência de rotação do motor apareceu com mais intensidade na sua frequência fundamental e nas harmônicas de ordem 6, 12, 18, 24, 30.

Os gráficos de vibração do Pálio mostraram um aumento da rotação do motor em 0,6 Hz quando a bomba foi desativada, como é visto na figura 4.6.

Tabela 3 - Médias de nível de pressão sonora na faixa de 20 a 500 Hz

	Bomba Acionada	Bomba Desativada
Pálio	76,1 dB	72,9 dB
Golf	56,3 dBA	50,9 dBA

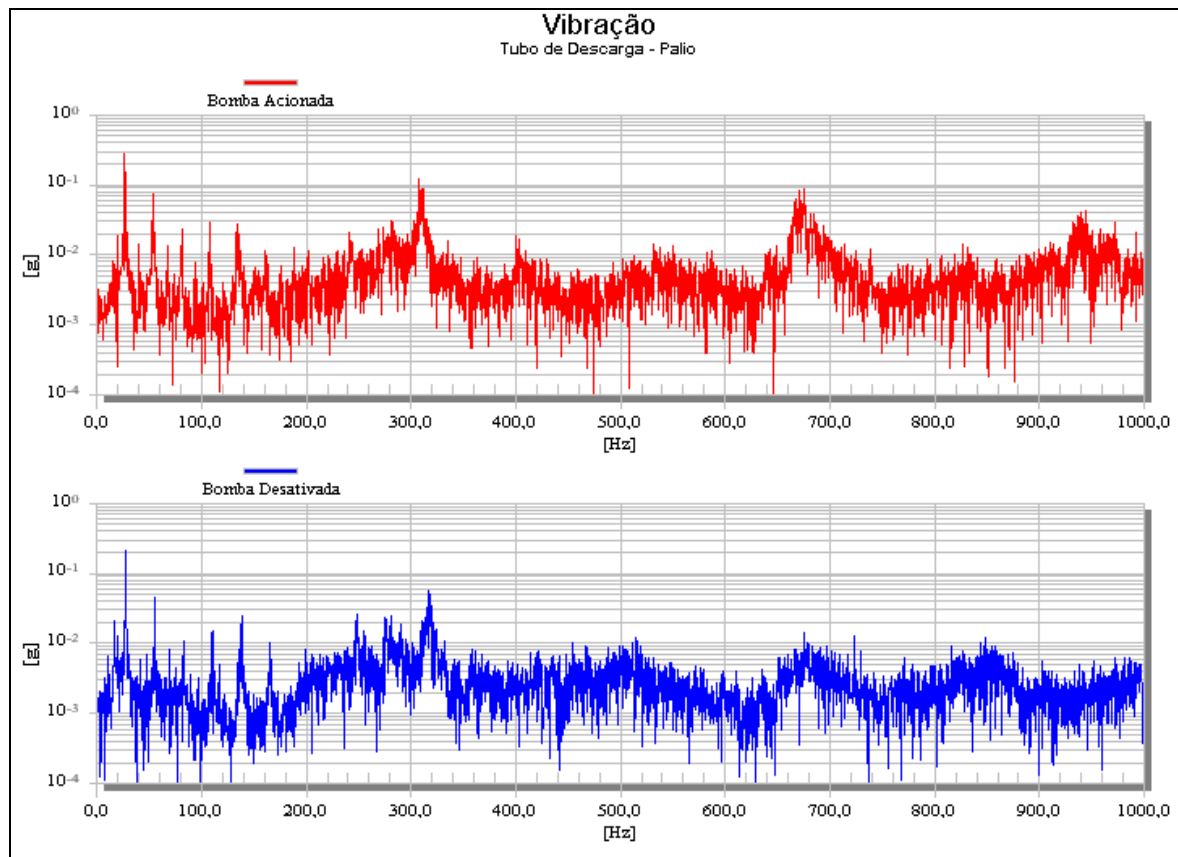


Figura 4.5 - Espectro de potência do Golf/Vibração - Bomba acionada (vermelho) e desativada (azul)

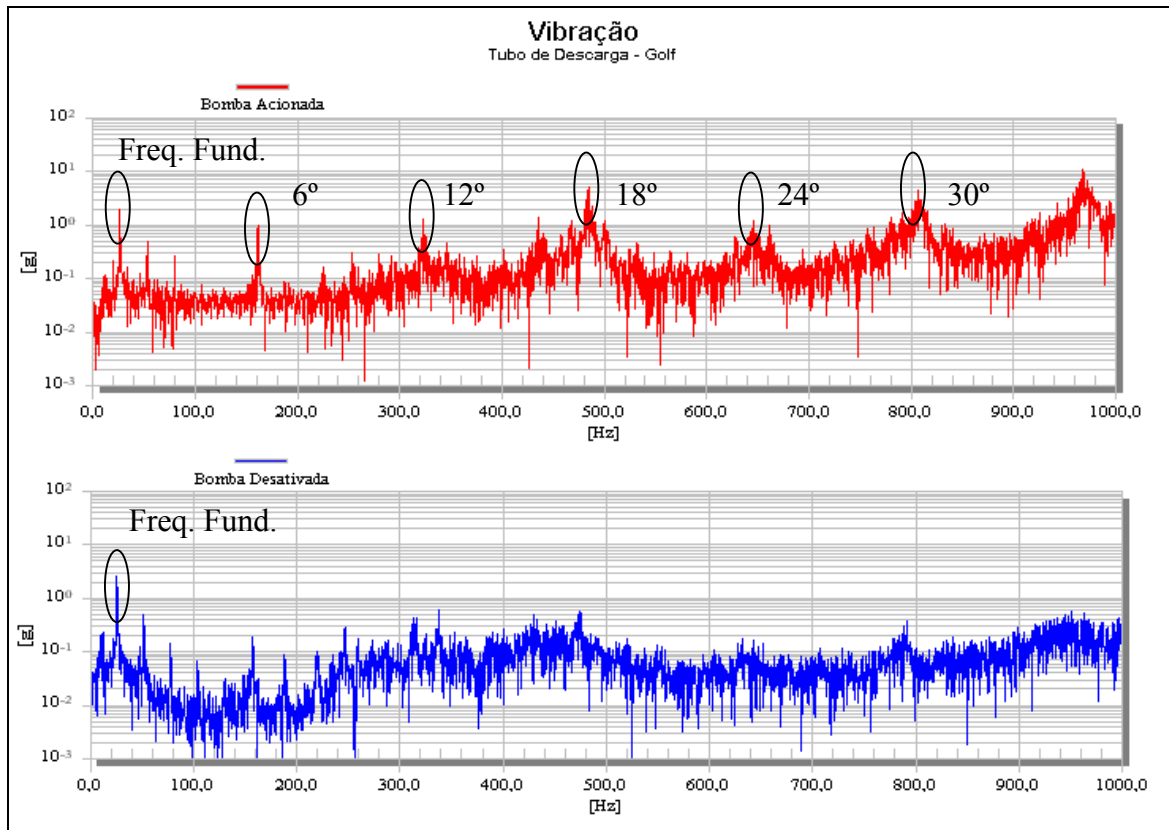


Figura 4.6 - Espectro de potência do Palio/Vibração - Bomba acionada (vermelho) e desativada (azul)

## 5 CONCLUSÕES

Várias considerações podem ser feitas a respeito do ruído moan a partir deste trabalho. Primeiramente, este ruído é afetado por vários fatores, de diversas naturezas. Começando por características inerentes à bomba de palhetas, como a pulsação de pressão na descarga da mesma. Seus três tipos de oscilação de pressão manifestaram-se nos gráficos de ruído e vibração obtidos nas avaliações em que se manteve a bomba solicitada pelo sistema de direção, condição favorável à geração do ruído *moan*, através de picos de amplitude nas frequências características das oscilações de pressão. Ficou claro também, em muitos casos, que principalmente nas frequências de passagem das pás da bomba e suas harmônicas, a amplitude do sinal apresentou um incremento quando da bomba acionada, mas ficou evidenciado também o aumento da amplitude em frequências relacionadas, segundo Kojima, 1984, à rotação do rotor da bomba, o que remete à oscilação de pressão de baixa frequência (*LFPO*) e a oscilação de pressão transiente de alta frequência (*THFPO*). O aumento significativo do nível médio de pressão sonora na faixa de 20 a 500 Hz nas avaliações com a bomba acionada também sugere que o ruído moan seja caracterizado por frequências contidas neste intervalo. Como já era esperado, as duas bombas avaliadas apresentaram estas características, reforçando esta hipótese como responsável pela geração do ruído *moan*. Estes dados nos levam a existência de uma relação entre as oscilações de pressão e o ruído *moan*.

A impedância do sistema hidráulico também é fator preponderante na amplificação da magnitude do ruído *moan*, como verificado por Kojima, 1984. Este parâmetro está relacionado principalmente à tubulação de saída da bomba, a qual pode ser de tubo metálico ou mangueira de borracha, ou ainda um trecho de cada, como é comumente adotado. Pode ser controlada por características da mangueira de pressão, como material, comprimento e, como

abordado no texto, diâmetro interno. Se a tubulação de descarga possui baixa impedância, esta absorve a energia das oscilações da pressão de descarga da bomba, porém diminui a assistência hidráulica ao motorista. Com um sistema de alta impedância, esta energia é transmitida à estrutura na forma de vibração e, dependendo das características dos substratos de fixação do sistema hidráulico, ser amplificada de maneira significativa, intensificando o ruído. No intuito de aprofundar-se no estudo do fenômeno, é necessária a realização de estudos e experimentos em relação a características do sistema, a fim de trazer dados pertinentes à impedância do mesmo.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Kojima, E., Shinada, M., Yoshino, T.. **Characteristics of Fluidborne Noise Generated by Fluid Power Pump**. Bulletin of JSME, vol. 27, nº 225. 1984

Bosch. **Automotive Handbook**. Robert Bosch GmbH, Germany. 1996

Gerges, S.N.Y.. **Ruído: Fundamentos e Controle**. NR Editora, Florianópolis. 2000

Linsingen, I. von.. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. Editora da UFSC, Florianópolis. 2001

DHB-CA.. **NE.0135-03 –Avaliação de Produtos em Veículo**. 1995

Delphi.. **Engineering Training – Pumps**. 1995

## 7 BIBLIOGRAFIA

Rayleigh, J.W.S.. **The Theory of Sound, Vol I**. Dover Publications, New York. 1945

Bruel & Kjaer. <http://www.bruelkjaer.com>. 2003

Christensen, J. J., Hald, J., Morkholt, J., Schuhmacher, A, Blaabjerg, C.. **A Review of Array Techniques for Noise Source Location**. Noise and Vibration Conference and Exhibition, Traverse City, Michigan. 2003

Marroquin, M.. **A Comparison of Seven Different Noise Identification Techniques**. Noise and Vibration Conference and Exhibition, Traverse City, Michigan. 2003

Carbary, K., Ulep, D., Witczak, R., Grenier, G., Dong, J., Steed, B.. **Power Steering Pump Sound Quality and Vibration – Test Stand Development**. Noise and Vibration Conference and Exhibition, Traverse City, Michigan. 2003

Wong, Tom.. **Hydraulic Power Steering System Design and Optimization Simulation**. SAE 2001 World Congress, Detroit, Michigan. 2001

## 8 ANEXOS

## Anexo I – Espectros de Potência das medições na carcaça da bomba do Palio

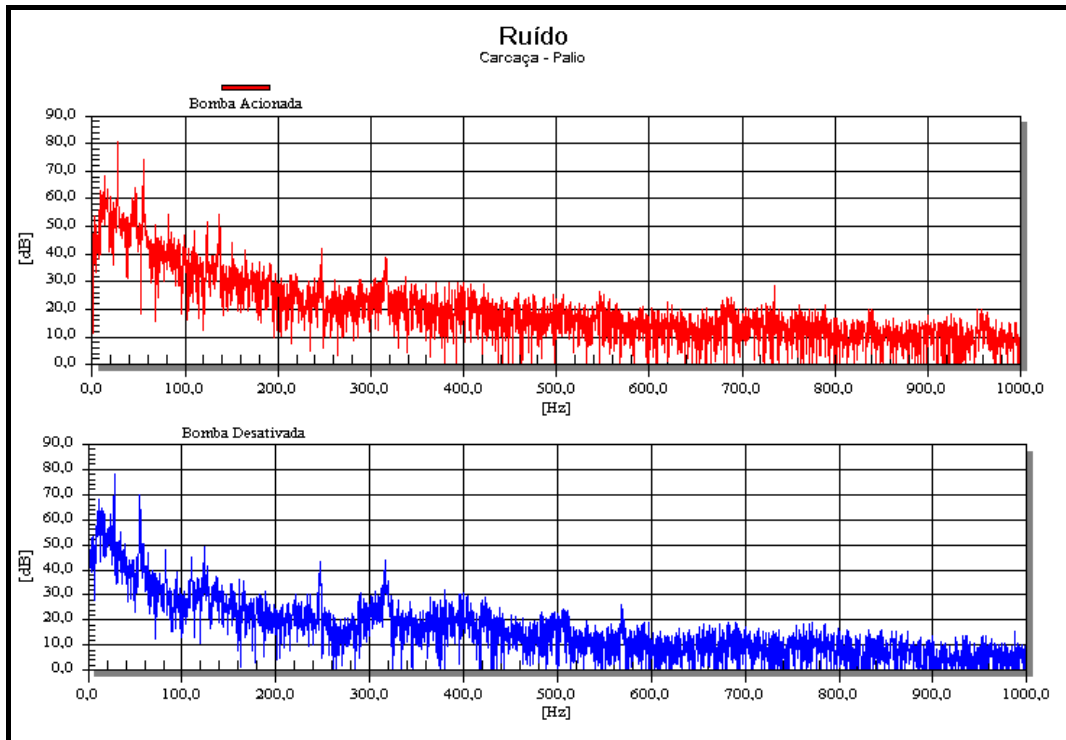


Fig. 8.1 – Espectro de Ruído/Palio – Carcaça – 0 a 1000 Hz

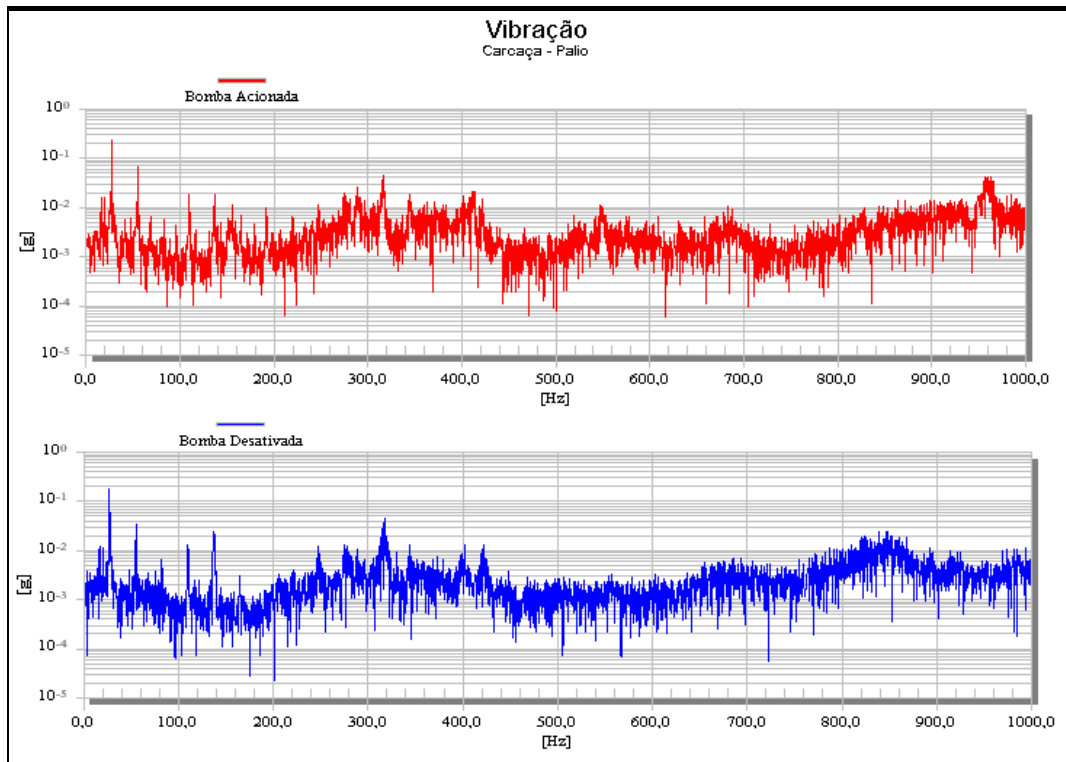


Fig. 8.2 – Espectro de Vibração/Palio – Carcaça – 0 a 1000 Hz

## Anexo II – Espectros de Potência das medições na sucção da bomba do Pálio

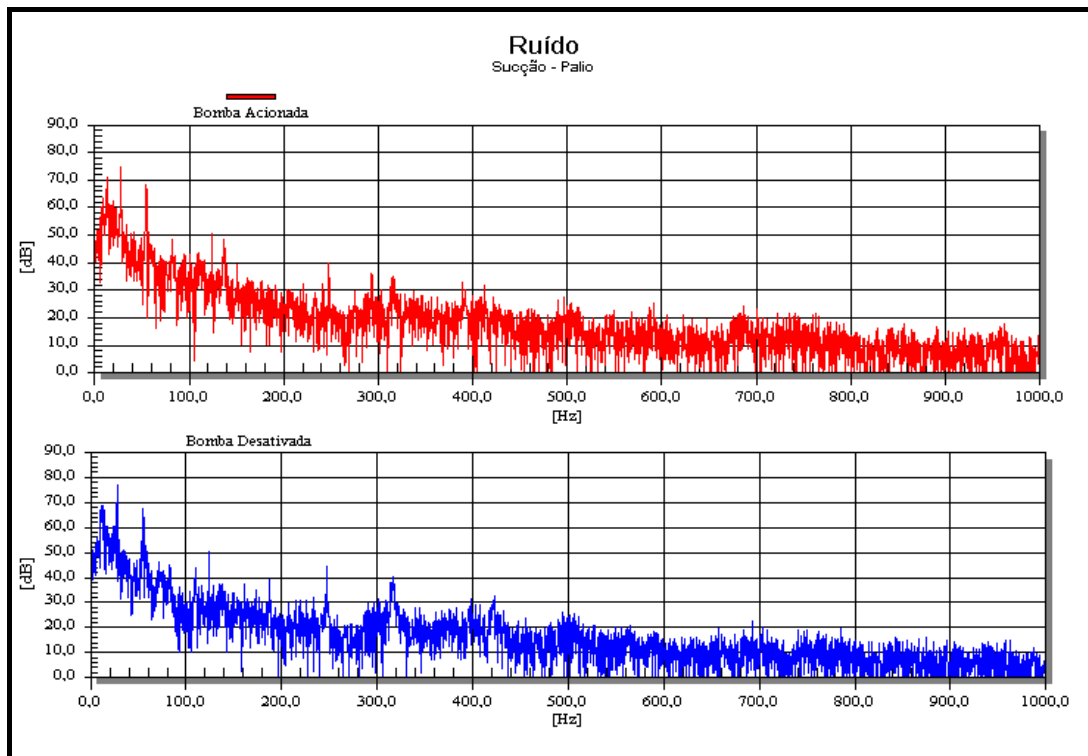


Fig. 8.3 – Espectro de Ruído/Pálio – Sucção – 0 a 1000 Hz

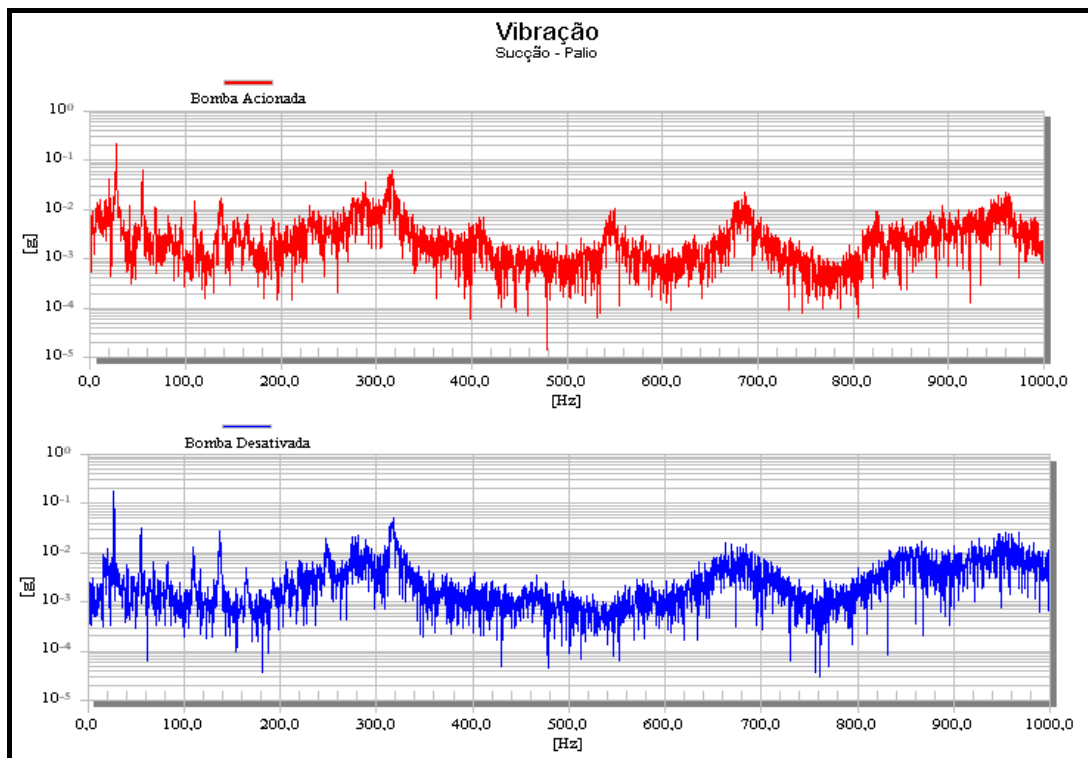


Fig. 8.4 – Espectro de Vibração/Pálio – Sucção – 0 a 1000 Hz



## Anexo III – Espectros de Potência das medições na descarga das bombas do Palio e Golf

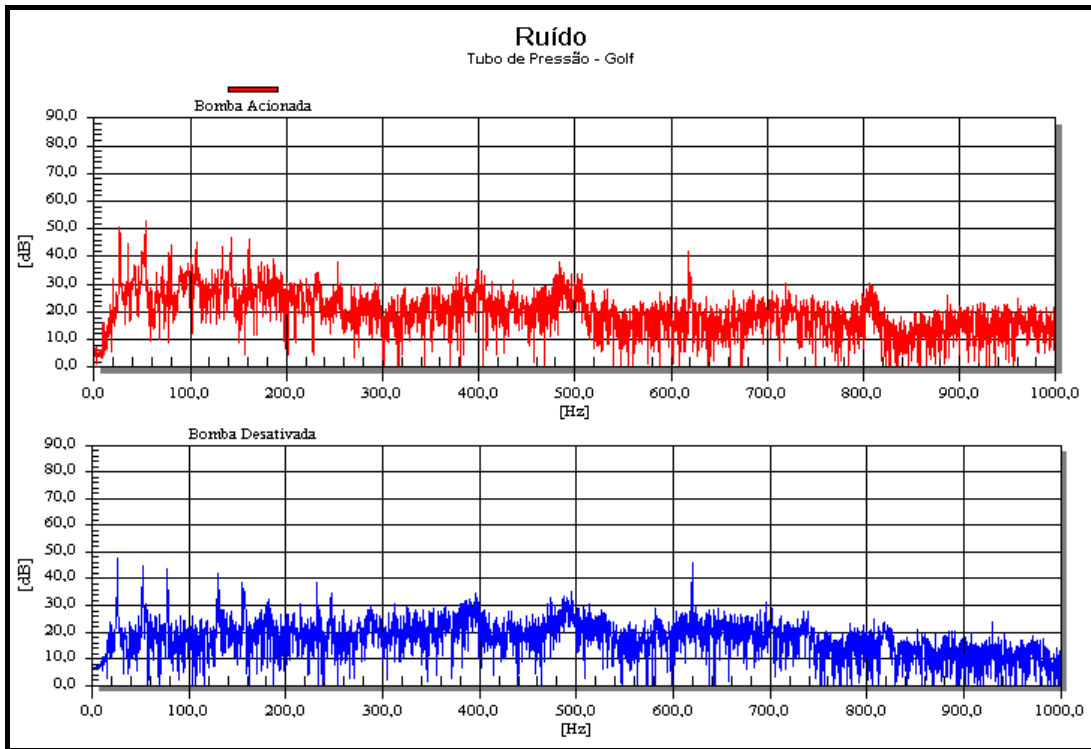


Fig. 8.5 – Espectro de Ruído/Palio – Sucção – 0 a 1000 Hz

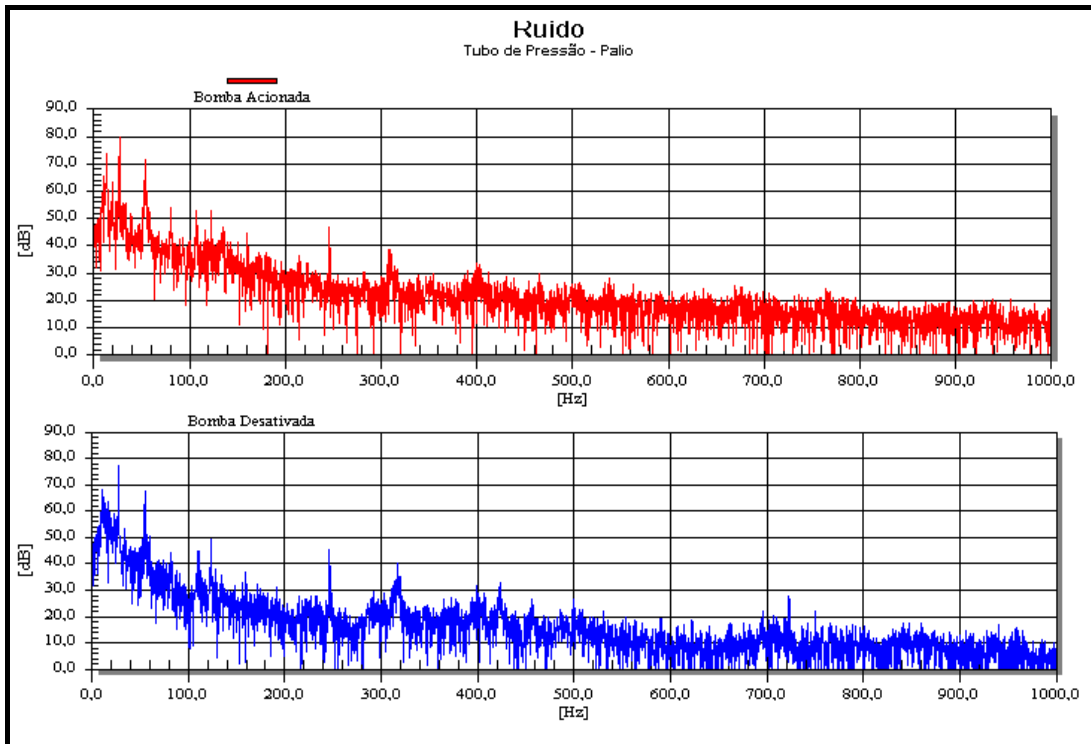


Fig. 8.6 – Espectro de Ruído/Palio – Sucção – 0 a 1000 Hz

## Anexo IV – Espectros de Potência das medições na sucção e carcaça das bombas do Palio

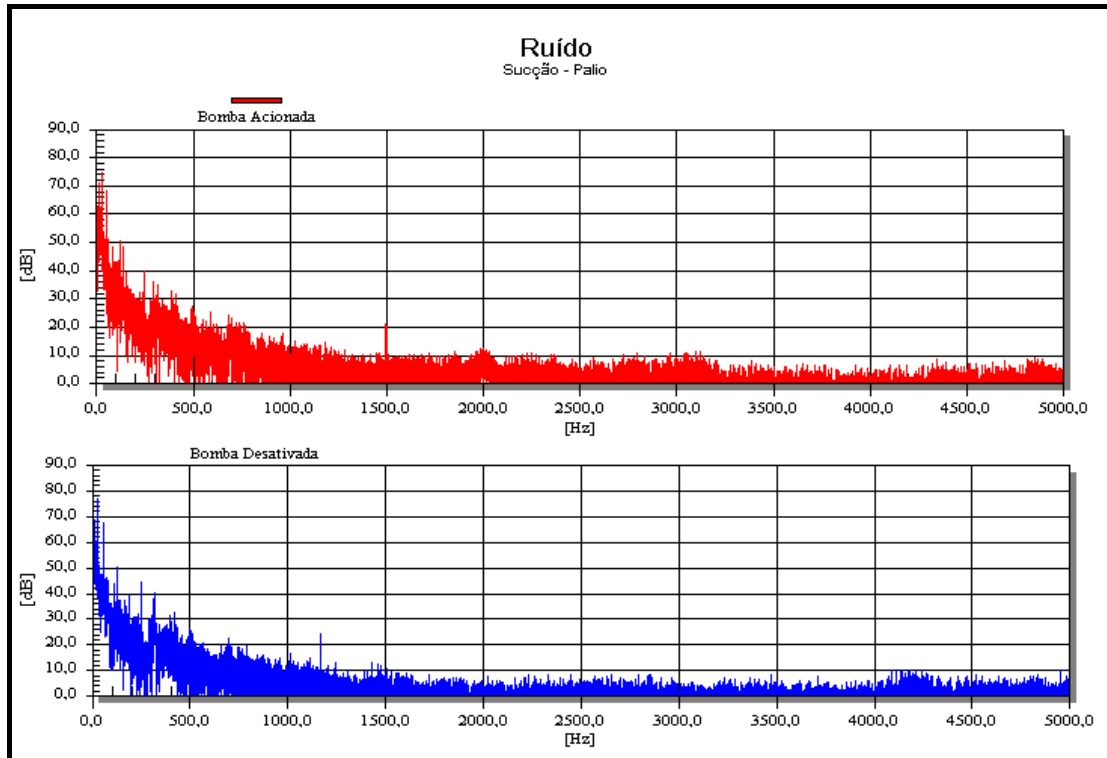


Fig. 8.7 – Espectro de Ruído/Palio – Sucção – 0 a 5000 Hz

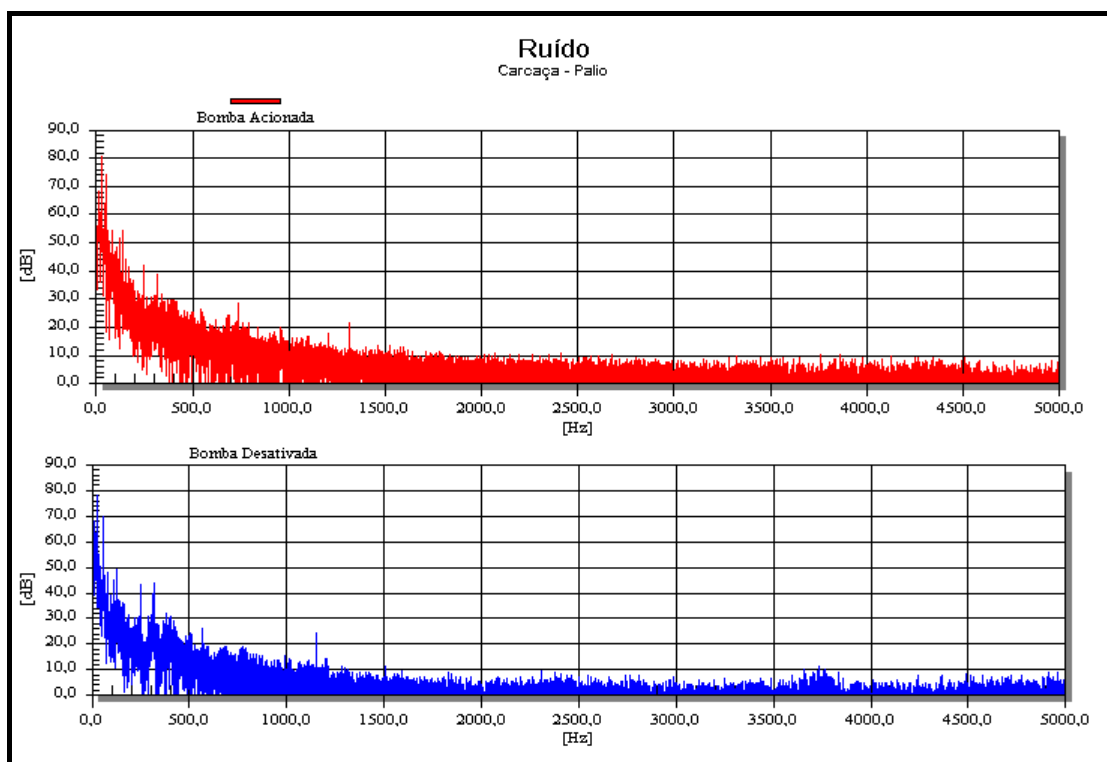


Fig. 8.8 – Espectro de Ruído/Palio – Carcaça – 0 a 5000 Hz