

METODOLOGIA HÍBRIDA PARA ESTIMATIVA DE FORÇAS ESTRUTURAIS APLICADA À VIBROACÚSTICA DE COMPRESSORES HERMÉTICOS

Israel Jorge Cárdenas Nuñez, israel.nunez@unifei.edu.br¹
Ana Lúcia Libardi De Marqui, ana.marqui@tecumseh.com²
Maria Alzira de Araújo Nunes, maanunes@unb.br³
José Roberto de França Arruda, arruda@fem.unicamp.br⁴

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI - Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Caixa Postal 50 - CEP: 37500 903 Itajubá – MG – Brasil.

²Tecumseh do Brasil Ltda., R. Cel. J. A. de Oliveira Salles, 478 – Caixa Postal: 54 – CEP: 13.560-971 – São Carlos – SP – Brasil.

³Universidade de Brasília, Faculdade do Gama, Área Especial 2, Lote 14, Setor Central, Cep: 72405-610, Gama-DF-Brasil.

⁴Universidade Estadual de Campinas – Cidade Universitária "Zeferino Vaz" – Barão Geraldo – CEP: 13.083-970 – Campinas – SP – Brasil.

Resumo: *Este trabalho apresenta uma metodologia híbrida para a estimativa das forças estruturais em compressores herméticos. Estas forças ocasionadas pelas vibrações mecânicas do rotor são transmitidas para a carcaça através da suspensão e tubo de descarga, ambos componentes internos deste tipo de compressor. Esta metodologia possibilita estimar a potência sonora radiada pelo compressor considerando somente esforços estruturais. Esta metodologia pode ser utilizada como uma poderosa ferramenta de projetos de carcaças de compressores objetivando a redução do ruído radiado por este em função da forma e espessura da estrutura das carcaças. Os resultados numéricos e experimentais são apresentados e discutidos.*

Palavras-chave: *compressor hermético, vibro-acústica, ruído irradiado, força internas.*

1. INTRODUÇÃO

A busca constante pela melhoria da qualidade de vida do ser humano no planeta tem sido um dos objetivos fundamentais da ciência. Nessa busca as questões que afetam a saúde e o conforto do homem ocupam lugar de destaque. Na área de sistemas de refrigeração, em particular na de compressores herméticos, o desenvolvimento de compressores com qualidade suficiente para atender as necessidades do mercado nacional e internacional tem mobilizado boa parte do esforço em pesquisas, desenvolvimento e inovação. Nessa busca, uma das exigências do mercado de compressores é obter produtos com baixos níveis de vibrações e ruído, uma vez que estes fenômenos se tornam fontes de desconforto para os usuários (Jeric, 2006).

Os compressores herméticos são geralmente constituídos por um conjunto interno, que contém um motor elétrico e um compressor alternativo de único pistão, ligado à carcaça através de uma suspensão de quatro molas inferiores, parcialmente mergulhadas em óleo lubrificante, e através do tubo de descarga (Oliveira, 2006). As principais fontes internas de ruído e vibrações de um compressor hermético são: a) a compressão do gás no interior do cilindro o qual excita o conjunto moto compressor; b) as forças eletromagnéticas no estator do conjunto moto-compressor; c) folgas internas encontradas principalmente no conjunto pistão-biela-eixo; d) vibrações transmitidas pelo sistema de descarga; e) vibrações transmitidas pelo óleo lubrificante e f) pulsação do gás no filtro acústico de sucção entre a carcaça e o conjunto moto-compressor (Nunes, 2005).

Existem diferentes caminhos de transmissão acústica como, por exemplo, a cavidade que transmite a pulsação do filtro acústico de sucção e a radiação sonora do conjunto moto-compressor para a carcaça através do campo acústico nela formado, irradiação dos componentes para carcaça e óleo de lubrificação (Haluk, 1999). Neste trabalho foram feitos os estudos apenas para os caminhos de transmissão representados pelas molas da suspensão, que transmitem as vibrações do sistema moto-compressor para a carcaça, e pelo tubo de descarga, que transmite as vibrações do bloco para a carcaça.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é apresentar um estudo híbrido (numérico e experimental) para quantificar as forças estruturais (molas e tubo de descarga) as quais são responsáveis pelo comportamento vibro -

acústico da carcaça dos compressores em estudo. A pesquisa se resume em três estágios. No primeiro, foram obtidos os modos de vibrar do compressor utilizando uma análise numérica via Método de Elementos Finitos (*FEM*).

No segundo estágio foram obtidos os caminhos de transferência acústica para uma carga unitária via Método de Elementos de Contorno (*BEM*).

Finalmente, no terceiro estágio, as medidas experimentais foram realizadas utilizando-se uma câmara semi-anecóica, a qual foi instrumentada com 10 microfones e o respectivo sistema de aquisição de dados. Com as forças estimadas via metodologia híbrida (*FEM-BEM-experimental*) é possível simular a pressão irradiada pelo compressor.

A organização do trabalho apresenta-se da seguinte forma: na seção 2 é discutida a metodologia e implementação do método híbrido, na seção 3 são apresentados os resultados numéricos e experimentais do método proposto e, finalmente, na seção 4 são apresentadas as devidas conclusões do trabalho.

2. METODOLOGIA HÍBRIDA

2.1. Conceito geral

A metodologia híbrida foi desenvolvida com o objetivo de obter numericamente os níveis de pressão sonora (*NPS*) em pontos específicos (segundo norma - ISO 1344) situados no campo externo do modelo do compressor (Fig. (1)).

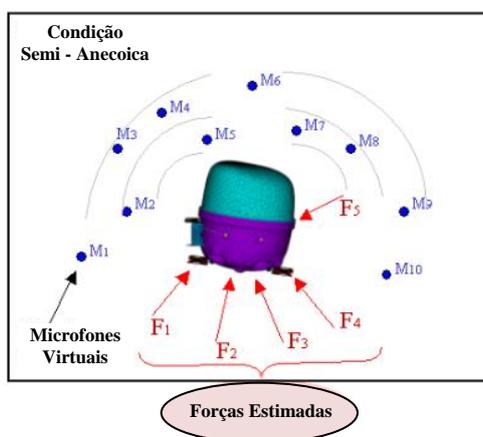


Figura 1. Modelo numérico do compressor.

Os níveis de pressão sonora são medidos por microfones virtuais {M1, M2,..., M10} utilizando o software de simulação LMS Virtual.Lab® (*Sysnoise*). Os parâmetros de entrada neste modelo são as forças de excitação aplicadas especificamente nas quatro molas da suspensão e na serpentina de descarga do modelo. (Fig. (2)).

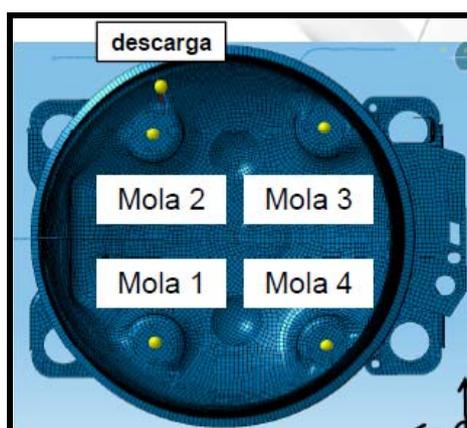


Figura 2. Pontos onde as forças de excitação são estimadas.

A obtenção das forças de excitação é feita através da metodologia híbrida, a qual estima o valor destas forças a partir de dados numéricos e experimentais. A seguir é apresentada esta metodologia.

2.2. Estimativa das forças estruturais aplicadas ao compressor

Para estimar as forças atuantes na carcaça do compressor é utilizada simulação por elementos de contorno (BEM) de um modelo numérico de compressor hermético incluindo o fluido que o envolve (ar) em um ambiente sem reflexões (campo livre). A partir deste modelo, podem-se obter funções de resposta em frequência (H_{ij} na Fig. (3)) entre forças unitárias (F_j) aplicadas nos cinco pontos de excitação e as pressões sonoras medidas virtualmente externamente ao compressor (P_i), conforme ilustrado na Fig. (3) e Eq. (1).

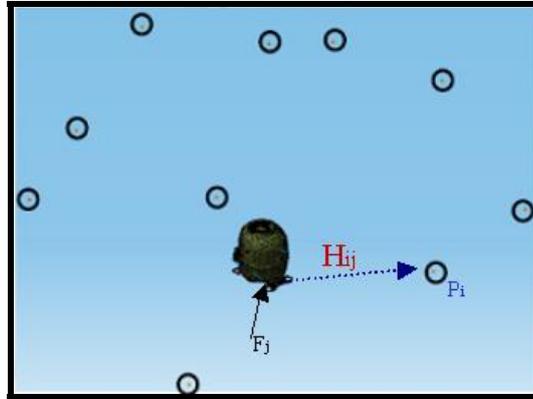


Figura 3. Obtenção das funções de transferência a partir do modelo numérico do compressor.

$$H_{ij}(\omega) = \frac{\hat{P}_i(\omega)}{F_j(\omega)} \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad \text{e} \quad j = 1, 2, \dots, 5 \quad (1)$$

onde, $H_{ij}(\omega)$ é a função resposta em frequência (FRF) entre as forças unitárias $F_j(\omega)$ atuando no grau de liberdade j e pressões sonoras $P_i(\omega)$ externas ao compressor (estimadas numericamente). O símbolo $\hat{}$ indica parâmetro estimado. Para obter a matriz $H_{ij}(\omega)$ de FRFs foi utilizado um vetor de forças unitárias $F_j(\omega)$.

De posse das FRFs estimadas numericamente para os graus de liberdade de aplicação das forças unitárias (modelo numérico) e das pressões sonoras obtidas experimentalmente em uma câmara semi-aneecóica para um compressor operando em condição de regime permanente, pode-se resolver o problema inverso e obter uma estimativa por mínimos quadrados para as forças estruturais dinâmicas que atuam no compressor. O problema inverso pode ser escrito agrupando as pressões medidas experimentalmente e as forças estimadas em vetores e as FRFs numa matriz para cada frequência, conforme Eq. (2).

$$\{\hat{F}(\omega)\} = [H(\omega)]^+ \cdot \{\hat{P}(\omega)\} \quad (2)$$

onde $[]^+$ denota a inversa generalizada de uma matriz retangular. No caso de mínimos quadrados temos:

$$[H]^+ = (H^T H)^{-1} H^T \quad (3)$$

onde, a dependência da frequência foi omitida para simplificar a notação e o subscrito **T** denota a transposta de uma matriz.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste trabalho adotou-se a hipótese de campo acústico livre (sem reflexões), o que pode ser simulado experimentalmente em uma câmara semi-aneecóica com as devidas correções nos dados adquiridos. O trabalho de cálculo das FRFs foi realizado utilizando o software de simulação LMS Virtual.Lab[®] e a obtenção das pressões acústicas experimentais foi feita segundo norma ISO 1344.

A partir das cinco forças unitárias $\{F_{m1}, F_{m2}, F_{m3}, F_{m4} \text{ e } F_{d5}\}$ e dos dez microfones virtuais $\{M_j \text{ onde } j = 1 \text{ até } 10\}$ foi possível obter a respectiva matriz de funções de transferência.

Na Fig. (4) está mostrado o gráfico apenas da função de transferência entre a força unitária na mola 1 e o microfone virtual M_j para $j=1$. A obtenção das outras funções de transferência foi obtida de forma análoga, totalizando 50 funções de transferência. Os valores nas coordenadas dos eixos nos gráficos foram omitidos devido à política de privacidade da empresa envolvida no trabalho.

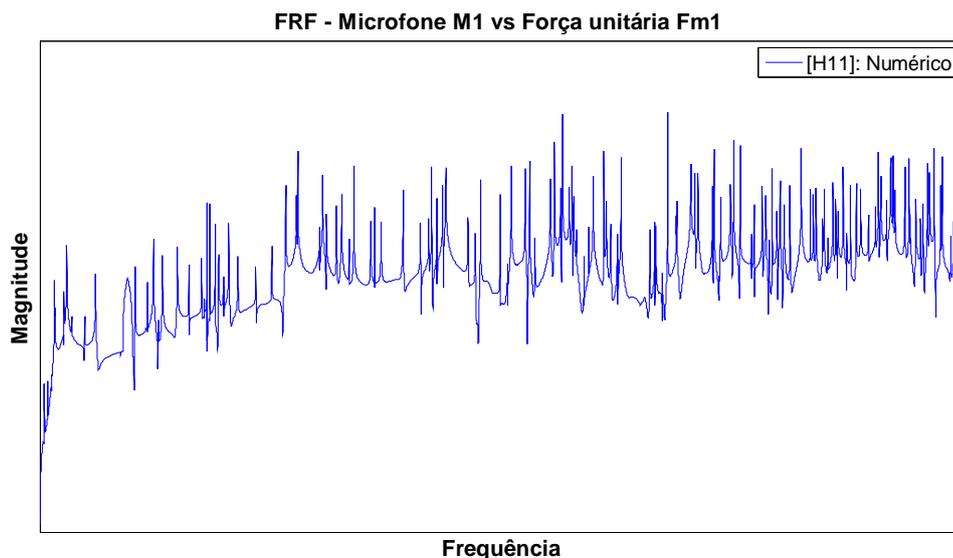


Figura 4. Função resposta em frequência entre o microfone M_1 e a força unitária aplicada na mola F_{m1} .

Na Fig. (5) é apresentada apenas a pressão acústica medida experimentalmente no microfone 1 em câmara semi-reverberante conforme norma ISO 1344. Observa-se o comportamento do ruído irradiado por um compressor trabalhando em regime permanente.

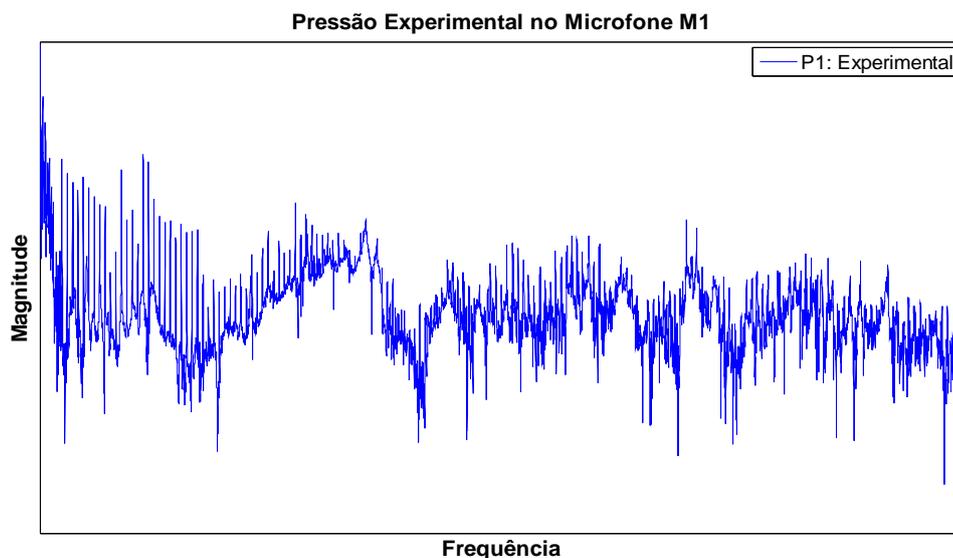


Figura 5. Pressão acústica medida experimentalmente no microfone M_1 .

A partir dos dados numéricos e experimentais, e utilizando a Eq. (2), obtiveram-se as forças estimadas via metodologia híbrida para as 4 molas e a serpentina de descarga, conforme mostrado na Fig. (6).

As forças estimadas foram analisadas segundo seu espectro de amplitudes associando a fenômenos físicos do compressor. Assim, em baixas frequências o espectro é dominado pela dinâmica modal das molas e da estrutura. Conforme a frequência aumenta deve-se notar a composição de forças aleatórias e forças periódicas advindas de fenômenos associados à rotação do rotor e ao movimento alternativo dos pistões, além de efeitos eletromagnéticos. Finalmente, em altas frequências, os ruídos aleatórios devidos aos escoamentos são predominantes.

Os erros de estimação presentes nas forças obtidas pelo método proposto são oriundos da diferença entre o modelo numérico (*MEF*) e o sistema real, como, por exemplo, a linearização do problema na faixa de frequência estudada.

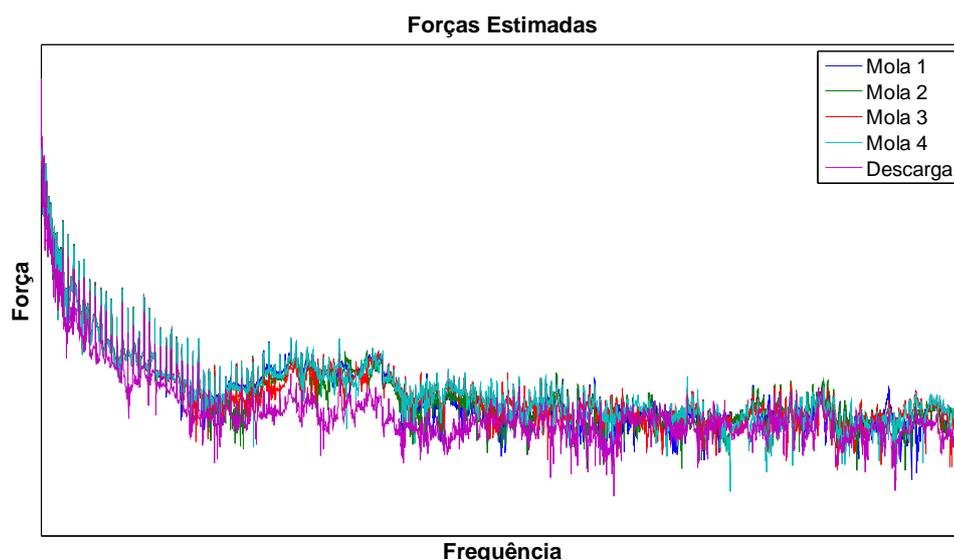


Figura 6. Forças estimadas a partir do método híbrido.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo híbrido (numérico e experimental) para quantificar as forças provenientes dos caminhos de transmissão acústica e vibratória da suspensão das molas e do tubo de descarga para a carga de um compressor hermético. Observou-se uma boa concordância entre os resultados obtidos e principalmente na identificação dos fenômenos que caracterizam as forças estudadas no sistema em questão. Os erros de estimação presentes nas forças obtidas pelo método proposto são oriundos da diferença entre o modelo numérico (*MEF*) e o sistema real, como por exemplo, a linearização do problema na faixa de frequência estudada.

Como trabalho futuro pretende-se verificar a qualidade do processo de estimação das forças, para o qual, pode-se prever o valor das pressões resolvendo o problema direto usando as forças estimadas e comparando depois o resultado com os valores medidos. É normal que os resultados não sejam idênticos, mas devem ser próximos e os espectros em decibéis devem mostrar de todo modo, uma boa semelhança.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte técnico da Tecumseh do Brasil Ltda e a colaboração do Departamento de Mecânica Computacional - DMC-FEM-UNICAMP. O primeiro autor agradece o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG.

6. REFERÊNCIAS

- Jeric A., Govekar E., Gradisek J. and Grabec I., "Influence of the Housing on the Noise Emitted by a reciprocating Compressor", The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, Vienna, Austria, July 2-6, 2006.
- Nunes O., "Análise Teórica e Experimental do Campo Sonoro Irradiado por um Compressor Hermético" - 88 p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- Oliveira A., "Adição de amortecimento estrutural usando materiais viscoelásticos", Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- Haluk E., "The Noise Source Identification of a Reciprocating Refrigeration Compressor", Sixth International Congress on Sound and Vibration, 5-8, Denmark, 1999.
- SYSNOISE Rev 5.5: User manual," LMS International (2000).

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso neste trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

HYBRID METHODOLOGY FOR ESTIMATION OF STRUCTURAL FORCES APPLIED TO VIBROACOUSTIC OF HERMETIC COMPRESSORS

Israel Jorge Cárdenas Nuñez, israel.nunez@unifei.edu.br¹
Ana Lúcia Libardi De Marqui, ana.marqui@tecumseh.com²
Maria Alzira de Araújo Nunes, maanunes@unb.br³
José Roberto de França Arruda, arruda@fem.unicamp.br⁴

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI - Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Caixa Postal 50 - CEP: 37500 903 Itajubá – MG – Brasil.

²Tecumseh do Brasil Ltda., R. Cel. J. A. de Oliveira Salles, 478 – Caixa Postal: 54 – CEP: 13.560-971 – São Carlos – SP – Brasil.

³Universidade de Brasília, Faculdade do Gama, Área Especial 2, Lote 14, Setor Central, Cep: 72405-610, Gama-DF-Brasil.

⁴Universidade Estadual de Campinas – Cidade Universitária "Zeferino Vaz" – Barão Geraldo – CEP: 13.083-970 – Campinas – SP – Brasil.

Resumo: *This paper investigates a hybrid method for the estimative of the structural forces in hermetic compressors. The forces applied in the compressor housing are transmitted through suspension springs and the discharge tube and they are responsible for the structure-borne noise, which is caused by the vibration of the housing induced by the compressor imbalance force. With the estimated forces it's possible using them to simulate the radiated sound pressure by the hermetic compressor considering only the structure-borne noise. This methodology demonstrated to be a powerful tool to redesign the shell shape of the hermetic compressor aiming the radiated noise reduction, where the project parameters can be shape and thickness. The numerical and experimental results are presented.*

Key words: *Hermetic compressors, radiated noise, internal forces.*