

ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE SUÇÃO NO RUÍDO GERADO POR COMPRESSORES HERMÉTICOS ALTERNATIVOS

Marlipe Garcia Fagundes Neto, Universidade Federal de Uberlândia, marlipeg@yahoo.com.br
Marcus Antonio Viana Duarte, Universidade Federal de Uberlândia, mvduarte@mecanica.ufu.br
Déborah Aparecida Souza dos Reis, Universidade Federal de Uberlândia, deborahsreis@gmail.com

Resumo: Os compressores herméticos alternativos são equipamentos fundamentais no ciclo de refrigeração, porém a vibração e o ruído que geram são fatores que mais afetam a percepção humana. Analisa-se a influência da pressão de sucção na contribuição do ruído para um compressor, são avaliadas pressões de 60 psi, 20 psi e em vazio. Baseada na análise espectral tempo frequência verifica-se que a abertura e impacto da válvula excita frequências diferentes na carcaça do compressor. Por fim, verifica-se que maiores pressões de sucção implicam em amplitudes maiores na carcaça do compressor hermético alternativo.

Palavras-chave: análise espectral, compressor hermético alternativo, ruído

1. INTRODUÇÃO

Os compressores herméticos alternativos são equipamentos fundamentais no ciclo de refrigeração. Eles são responsáveis pelo aumento da pressão e garantir o movimento do fluido no ciclo. Geisel (2007) destaca que estes compressores são a melhor opção técnico-econômica à indústria de refrigeração, pois o mecanismo de compressão do tipo biela manivela permite alta confiabilidade e baixo custo de fabricação.

Apesar de tais equipamentos serem essenciais para o conforto térmico humano ou na conservação de alimentos, os compressores são fontes de ruído e vibração. Kim, Cho e Chou (2000) destacam que dentre vários fatores que determinam o conforto humano, o ruído e vibração, são dois fatores de perturbação que mais afetam a percepção humana, e a busca por melhores projetos, tanto no âmbito da vibração, ruído como na eficiência são tópicos de estudos de vários pesquisadores.

Ramani et al. (1994) relata que até 1970 as tecnologias e pesquisas visavam reduzir o peso dos compressores, em portanto estes eram bastante ruidosos. Após a otimização deste problema, iniciaram diversos trabalhos na compreensão dos mecanismos de geração, transmissão e radiação de ruído dos compressores herméticos alternativos. Em 1972, Ingalls avalia que o ruído é subdividido em dois grupos: radiado pelo movimento de corpo sólido, predominante nas frequências abaixo de 500 Hz, e radiado pela deformação da carcaça que atuam nas frequências próximas de 2000 Hz, para compressores de pequeno porte. Na década de 80, Tojo (1980), observa que os compressores possuem dois caminhos de transmissão de energia: aéreo, via cavidade acústica, e estrutural, via molas de suspensão e tubo de descarga. Em sequência Biscaldi, Faraon e Sarti (1998) relatam a importância e a influência do óleo lubrificante, pois além de um caminho de transmissão, ele aumenta a densidade modal da carcaça do compressor.

Outros autores desenvolveram estudos de identificação das principais fontes de ruído, as quais são as forças de desbalanceamento dinâmico, motor elétrico, abertura e impacto das válvulas de descarga e sucção, aliada a pulsação do fluido na câmara de sucção (Sangoi, 1983; Diesel, 2000; Rovaris, 2004 e Neto, 2015). As metodologias utilizadas pelos autores destacam-se nos modelos matemáticos, modelos numéricos, análise e processamento de sinais, ora aplicados individualmente, ora em conjunto. Kim, Cho e Chou (2000) menciona que a partir da natureza complexa da geração e transmissão de ruído e vibração dos compressores torna-se indispensável a aplicação de várias técnicas para identificar as várias fontes e caminhos de transmissão. Fato que impulsiona novas metodologias na busca por melhor identificação das fontes de ruído, como por exemplo, a metodologia híbrida usada por Nuñez et al. (2010) e a técnica do vetor de transferência acústica aplicada por Silva (2014).

Metodologias recentes propõem o uso e o confronto de várias técnicas, pois além da natureza complexa de geração e transmissão de ruído algumas são não estacionárias. Gu, Zhang e Xu (2012) exemplificam o momento de abertura da válvula como crítico no ciclo de compressão e sugerem uma análise baseada na posição angular. Segundo os autores, as metodologias baseadas em análises experimentais e processamento de sinais são mais atrativas, quando deseja-se conservar e analisar a complexidade das fontes.

As ferramentas de análise no domínio espectral são bastante utilizadas na identificação de ruído em compressores. A transformada de Hilbert-Huang (HHT) apresenta característica que possibilitam análise com boa resolução em tempo e frequência, e tem sido aplicada com sucesso em várias áreas como dinâmica de fluidos (Rao R, et al., 2008, apud Pinto, 2009), aplicações financeiras (Huang N. et al., 2003, apud Pinto, 2009), sinais biomédicos (Pinto, 2009) e detecção de falha em rotores (Lei, Y. e Zuo, M. J., 2009).

Portanto, objetiva-se avaliar a influência da pressão de sucção no ruído gerado durante o ciclo de compressão, a qual traduz-se na pulsação da pressão no interior da câmara de sucção, bem como na abertura e impacto das válvulas no

compressor hermético alternativo. E, devido a característica não estacionária das válvulas utilizam-se as ferramentas de análise espectral clássica confrontadas com a HHT.

2. ANÁLISE ESPECTRAL NÃO ESTACIONÁRIA

Segundo Pinto (2009) a análise espectral tem como objetivo principal identificar regularidades e tem na sua base a teoria matemática da análise de Fourier, onde se propõe decompor funções periódicas em somas de funções senoidais. As representações espectrais clássicas estão definidas para dados estacionários e sistemas lineares, sendo estas características as principais limitações de tais técnicas. À exemplo, a Transformada de Fourier (FT) de um sinal no domínio do tempo $s(t)$ para o domínio da frequência $S(f)$ é definida por:

$$S(f) = \mathcal{F}\{s(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

Ademais, durante o ciclo de compressão há fontes de ruído de características não estacionária (abertura e impacto da válvula), isto é, instantes de tempo com características distintas no ciclo. Dessa forma, para análise em tempo-frequência propõe-se a Transformada de Fourier por Janelas (STFT) e a HHT.

2.1. Transformada de Fourier por Janelas

Dado que um dos problemas do uso da transformada de Fourier é a localização temporal, a ideia natural é a de dividir o sinal em janelas, e calcular para cada uma destas janelas a FT. Mais formalmente pode-se multiplicar o sinal por uma janela $w(t)$ centrada num instante t_n considerado de interesse, e calcular a transformada de Fourier deste produto. Por forma a se obter a variação espectral com o tempo, este procedimento repete-se para todos os instantes t . Assim define-se a STFT na Eq. (2) e a energia da STFT na Eq. (3):

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)w(t - \tau)e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

$$S(t, f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t)w(t - \tau)e^{-i2\pi f\tau} d\tau \right|^2 \quad (3)$$

Verifica-se na Eq. (2) a amplitude do sinal em função do tempo e da frequência, portanto considera-se o sinal não estacionário, possibilitando uma análise das componentes de frequência em intervalos de tempo, por exemplo, no instante de abertura da válvula. Porém, nota-se que quando deseja-se maior resolução temporal a janela $w(t)$ deve ser a menor possível, o que introduz uma diminuição na resolução em frequência, pois a energia do sinal (Eq. (3)) é regida pela dualidade do tempo frequência. O valor limite inferior para o produto tempo frequência da desigualdade de Heisenberg-Gabor é $1/4\pi$ (Boashsh, 2003, Flandrin, 1993 e Gabir, 1946 apud Pinto, 2009).

2.2. Transformada de Hilbert-Huang

Os dados reais que precisam ser processados e que existem nas mais variadas áreas do conhecimento, são na sua grande maioria não estacionários e os sistemas de onde os mesmos são provenientes são não lineares. No caso da HHT, os problemas da não estacionariedade e não linearidade são ultrapassados uma vez que usa uma decomposição que deriva do próprio sinal, é adaptativa e a posteriori. Entretanto, a solidez da formulação matemática que sustenta os métodos não adaptativos (FT, STFT, ...) contrasta com a fragilidade do método empírico proposto pela HHT.

A HHT é um método de análise em tempo frequência que comporta duas etapas. A primeira (Decomposição Empírica Modal - EMD) permite obter um conjunto de funções base de forma adaptativa, e a segunda (Análise Espectral por Hilbert - HSA) possibilita a obtenção de uma representação no domínio tempo frequência através do cálculo da transformada de Hilbert de cada uma das funções obtidas na primeira parte por EMD (Pinto, 2009).

As limitações referentes ao uso direto da transformada de Hilbert, para que se possam obter componentes para as quais não sejam negativas as frequências instantâneas, é necessário que os elementos de tal base sejam simétricos relativamente à média local e que apresentem o mesmo número de zeros e extremos relativos. Tendo por base tais observações foi proposta por uma classe de funções (Funções de Modos Intrínsecos - IMF) que cumpre os requisitos indicados (Huang et al., 1998, apud Pinto, 2009).

Dessa forma, seja $x(t)$ uma IMF, o sinal analítico $z(t)$ é obtido via transformada de Hilbert, conforme Eq. (4).

$$z(t) = x(t) + iH(x(t)) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (4)$$

Onde pode-se definir a frequência instantânea por:

$$w = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5)$$

Após calcular a transformada de Hilbert de cada IMF e obter para cada IMF a frequência instantânea é possível representar o sinal original através de um processo de síntese definido por:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i(\int w_j(t) dt)} = H(w, t) \quad (6)$$

Equação (6) ilustra o espectro de Hilbert-Huang, verifica-se para cada instante a contribuição em frequência e também energia associada a cada par de tempo frequência.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar a influência da pressão de sucção no ruído gerado por compressores hermético alternativo, são experimentados três níveis de pressão na sucção do ciclo de refrigeração. O aparato experimental consiste de um sistema de refrigeração composto pelo compressor hermético alternativo, modelo TA-8003-BR da fabricante Tecumseh, conectado a unidade condensadora, tubo capilar e unidade evaporadora, os quais compõem um sistema fechado e permitem o compressor funcionar nas condições operacionais. O sistema é alimentado com fluido refrigerante R134a e o compressor opera na temperatura aproximadamente de 47°C (medida na parte superior da carcaça).

Adquire-se os sinais da vibração, medidas na carcaça do compressor, onde as configurações de pressão são: 60 psi, 20 psi e em vazio. Os sinais são medidos durante 10 segundos, com frequência de aquisição 25600 Hz e resolução de 0,1 Hz. O sistema de aquisição é composto de 12 acelerômetros, PCB modelo 352C33, placa de aquisição, Bruel & Kjaer 3560-C com módulo 3038 e computador com software PULSE. A Fig. (1) ilustra o esquema de montagem do aparato experimental.



Figura 1: Esquema de montagem do aparato de experimental.

Selecionam-se 7 pontos aleatórios na carcaça do compressor, 4 pontos posicionados na base de suporte das molas e 1 ponto próximo ao canal de sucção, totalizando 12 pontos de medição. Os acelerômetros localizados nas molas de suporte e canal de sucção são escolhidos por representarem importantes caminhos de transmissão estrutural e os os pontos distribuídos na carcaça buscam expressar a influência no caminho de transmissão aéreo.

4. RESULTADOS

Devido a quantidade de dados apresentam-se na Fig. (2) os valores da média quadrática (Root Mean Square - RMS) e fator crista (razão entre amplitude máxima e valor RMS). Com a finalidade de verificar quais sinais são mais sensíveis a variação da pressão sucção no conjunto de geração de ruído do compressor hermético alternativo. Os sinais de aceleração adquiridos na região próxima ao canal de sucção são representados pelo sensor 1, os sinais na mola de suporte pelos

sensores 2 a 5 e os sensores numerados de 6 a 12 estão dispostos na carcaça. Ressalta-se que apesar dos 10 segundos de aquisição, são analisados apenas 5 períodos ou ciclos de operação.

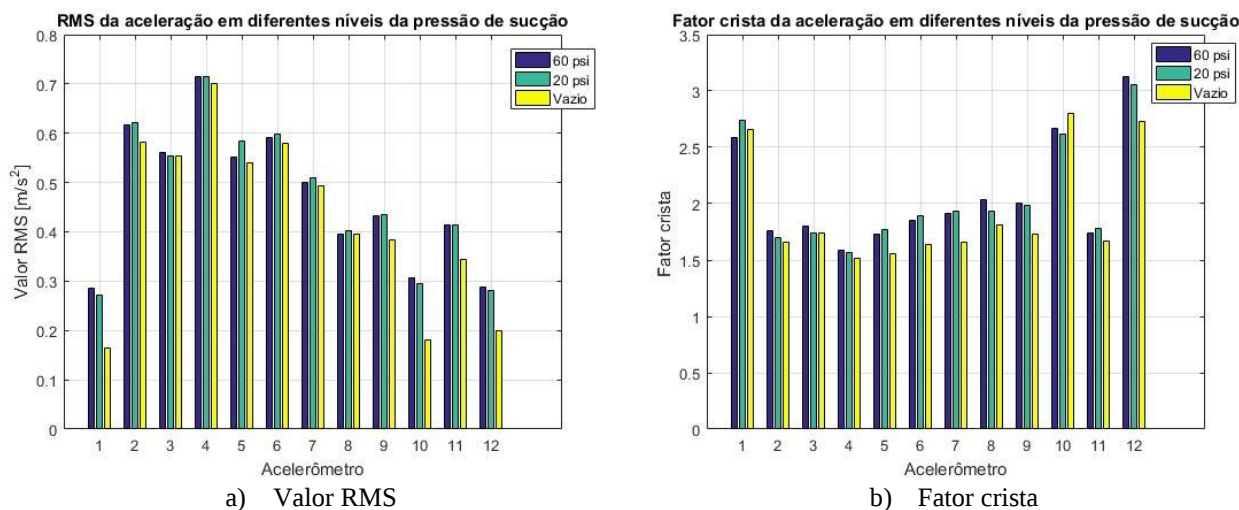


Figura 2: Valores RMS e fator crista para os sinais adquiridos em função da variação da pressão de sucção.

Verifica-se na Fig. (2) as regiões do suporte de mola apresentam os maiores valores RMS, a região do canal de sucção possui amplitudes maiores em relação ao sinal adquirido nas molas e a carcaça ora apresenta sinais com valor RMS baixo e fator crista alto ora ao contrário. Ademais, nota-se a pressão de sucção em vazio minimiza os valores RMS e fator crista. Por sua vez, a redução pressão de 60 para 20 psi não traduz em menores amplitudes em todos os pontos de medições propostos. Deste modo, selecionam-se para análise espectral os sinais dos acelerômetros 1 e 12.

Os espectros de frequência da aceleração via TF para os sinais selecionados estão dispostos na Fig. (3) para os níveis de pressão de sucção propostos. O espectro é construído com 1024 pontos para melhor visualização no domínio da frequência.

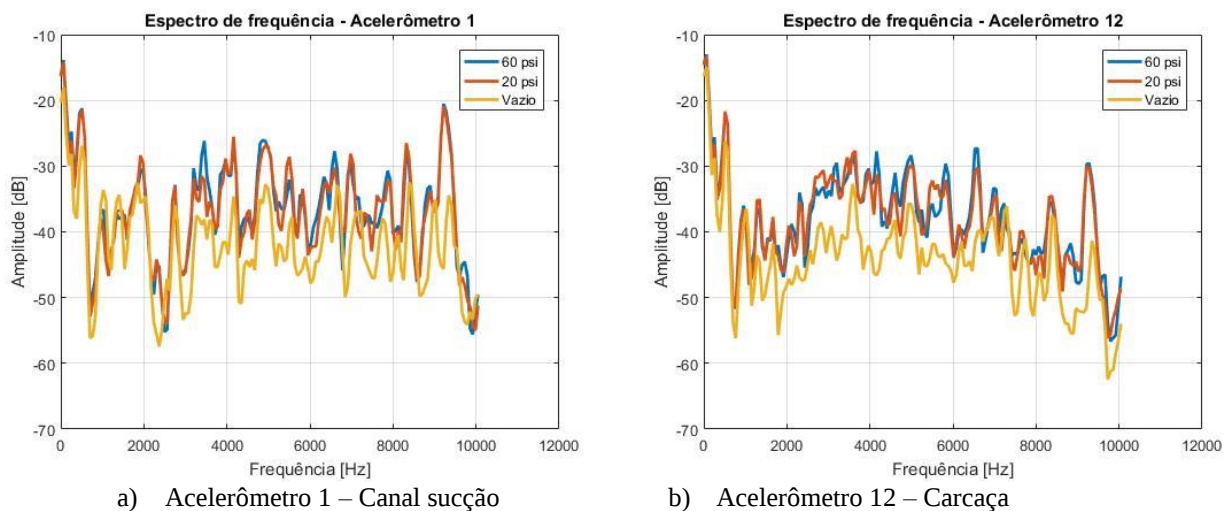


Figura 3: Espectro de frequência via FT em função da variação da pressão de sucção.

O espectro de frequência apresenta menores amplitudes quando a pressão de sucção está em vazio e diferenças pontuais existem quando a pressão abaixa de 60 para 20 psi. Observa-se que as mudanças ocorrem acima de 3 kHz no ponto próximo ao canal de sucção, entretanto para o acelerômetro na carcaça a pressão de sucção apresenta variações para as frequências superiores a 1 kHz. E, relata-se que as maiores amplitudes ocorrem nas baixas frequências e estas não apresentam influência dos níveis de pressão de sucção e atribui-se as baixas frequências o mecanismo de compressão aliado ao motor elétrico. Por fim, destaca-se que o sinal medido no canal de sucção possui mais energia que o adquirido na carcaça.

Com a finalidade de avaliar os efeitos não estacionários nos pontos em destaque, na Fig. (3) possui o espectro em função do tempo frequência via STFT.

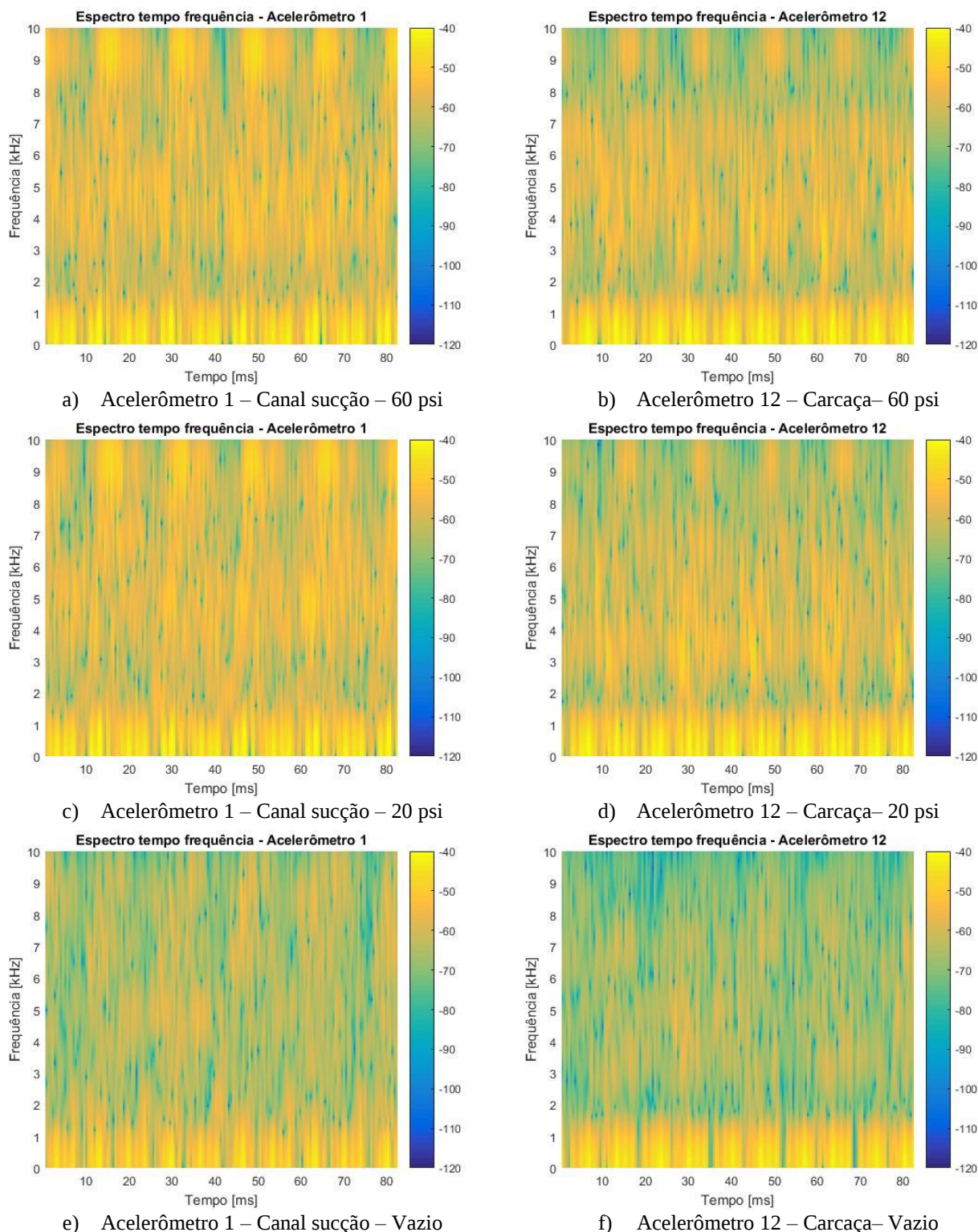


Figura 4: Espectro de tempo frequência via STFT em função da variação da pressão de sucção.

Na Fig. (4) visualiza-se a variação da energia dos sinais em função do tempo e frequência, tal ferramenta permite inferir que o sinal analisado possui 5 ciclos de operação de compressão, tais eventos são observados com clareza nos ensaios de maior nível de pressão de sucção, isto é 60 e 20 psi, ressalta-se que em vazio é possível notar o evento, porém devido a dualidade tempo frequência de Heisenberg-Gabor existe uma limitação na escolha da resolução temporal e no domínio da frequência, fato que dificulta a interpretação dos ciclos em algumas regiões de frequência.

Conforme relatado na análise via FT a mudança da pressão de sucção é observada nas frequências superiores a 3 kHz e 1 kHz para o primeiro e último sensor, respectivamente. Ainda, expõem-se que a mudança desta pressão traduz-se em instantes temporais de amplitudes elevadas, presume-se a abertura e impacto da válvula responsáveis pelas mudanças no espectro de vibração dos compressores, onde menores amplitudes estão correlacionadas com pressão de sucção menores.

Entretanto, pouco infere-se sobre o momento de abertura da válvula, visto a limitação da resolução temporal em favor da resolução da frequência. Deste modo, apresentam-se na Fig. (5) a variação da energia vibratória via HHT para 8 IMF.

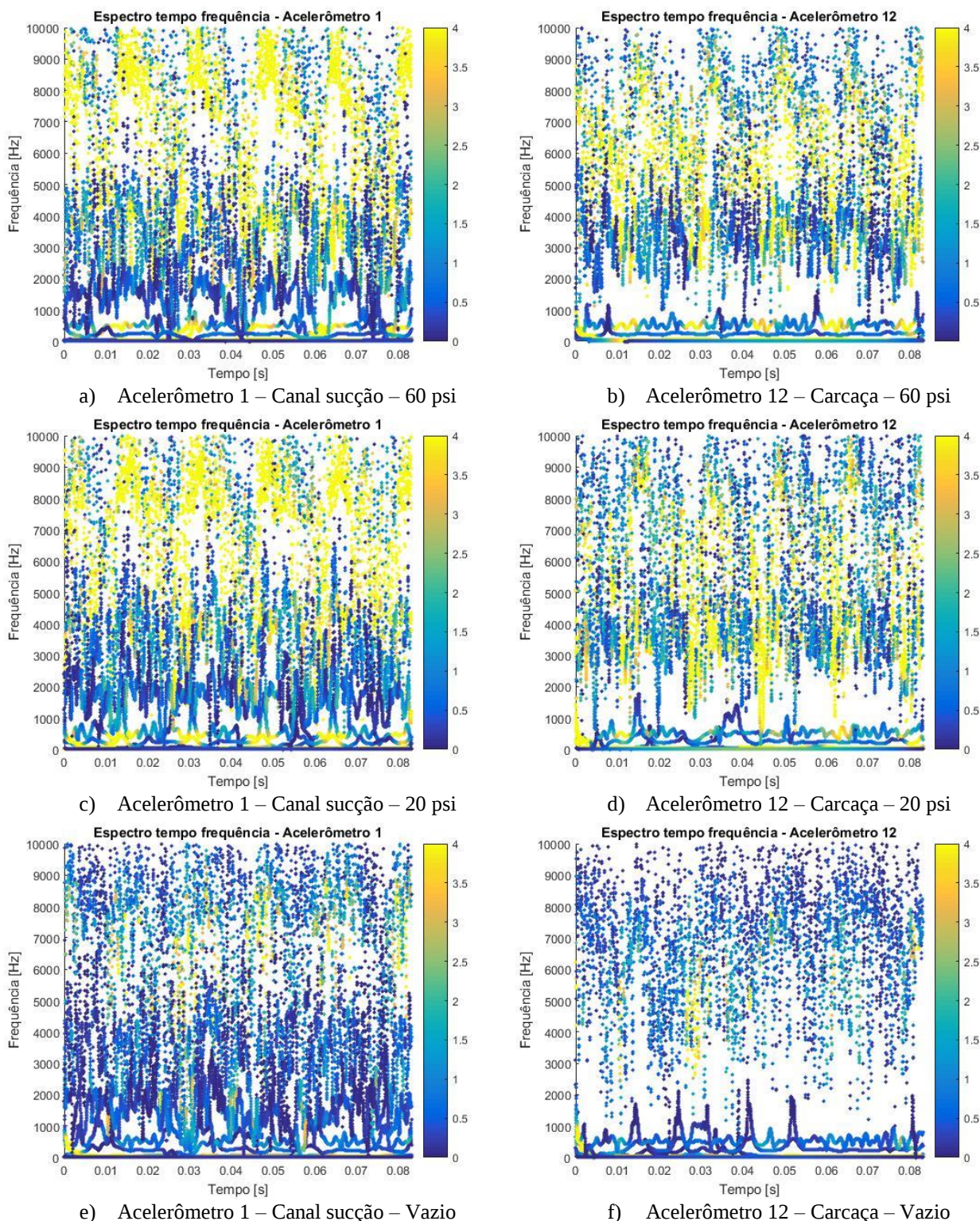


Figura 5: Espectro de tempo frequência via HHT para 8 IMF em função da variação da pressão de sucção.

Verifica-se na Fig. (5) que o aumento da pressão de sucção corrobora o aumento da energia vibratória devido a abertura e impacto da válvula. Na análise via HHT é notável o momento de abertura e impacto da válvula no primeiro sensor, representado pelo IMF destacado pela cor amarela, a qual apresenta instante de excitação em várias faixas de frequência. Em sequência nota-se que energia vibratória deste evento perpetua por alguns instantes nas altas frequências, 8 a 9 kHz, e apresenta um segundo, porém menor, instante de excitação de algumas frequências, associa-se este evento a variação da pressão na câmara de sucção conforme trabalho de Pereira (2006).

Na carcaça identifica-se também os momentos de abertura da válvula, relatada pela excitação em várias faixas de frequência, entretanto a região mais afetada encontra-se na faixa de frequência próxima a 4 kHz. Destaca-se que para 60 psi há maiores níveis energias também na faixa próximo a 6 kHz.

Por fim, o ponto próximo ao canal de sucção apresenta maiores níveis de energia distribuído ao longo de toda a faixa de frequência, por sua vez o ponto na carcaça apresenta sua energia nas baixas frequência e média frequência, exceto a faixa próxima a 2 kHz.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados conclui-se que as molas de sucção, canal de sucção e carcaça são caminhos de transmissão de ruído nos compressores herméticos alternativos. A pressão de sucção está correlacionada com níveis de ruído emitido, valores maiores de pressão implicam e maiores amplitudes de vibração. A situação menos enérgica é apresentada quando o compressor está em vazio. O canal de sucção apresenta mais energia vibratória que o ponto referente ao último sensor posicionado na carcaça. Ainda, diferentes regiões do compressor são excitadas em diferentes faixas de frequência. A abertura e impacto da válvula é expressa por variação de frequência em todo espectro de frequência. As ferramentas STFT e HHT permitem avaliar a energia do sinal em tempo frequência. A STFT possui limitação da resolução temporal e da frequência. A HHT permite avaliar o sinal com melhores resoluções ambas temporal e no domínio da frequência.

6. REFERÊNCIAS

- Biscaldi, E. Faraon, A., Sarti, S. “Numerical prediction of the radiated noise of hermetic compressor under the simultaneous presence of different noise sources” *International Compressor Engineering Conference*, Paper 1262, 1998.
- Diesel, F. N. “Fluxo de energia sonora do conjunto interno moto compressor para carcaça de compressores herméticos através da cavidade” *Dissertação de mestrado*, UFSC, Florianópolis, 2000.
- Geisel, T. “Estudo e projeto de motores de alta velocidade para aplicação em compressores herméticos”. *Dissertação de mestrado*, UFSC, Florianópolis, 2007.
- Ingalls, D. J. “Understanding noise radiation from a hermetic compressor” *International Compressor Engineering Conference*, Paper 12, 1972.
- Kim, H., Cho, Y. M., Chou, R. “Noise source identification in a Rotary compressor: A Multidisciplinary synergetic approach” *International Compressor Engineering Conference*, Paper 1437, 2000.
- Lei, Y. e Zuo, M. J. “Fault diagnosis of rotating machinery using an improving HHT based on EEMD and sensitive IMFs”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, 12, 2009.
- Neto, G. M. “Análise da contribuição das forças magnéticas no comportamento vibroacústico de um compressor alternativo” *Tese de doutorado*, UFSC, Florianópolis, 2015.
- Núñez, I. J. C., et al “Metodologia híbrida para estimativa de forças estruturais aplicadas à vibroacústica de compressores herméticos” *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Campina Grande, 2010.
- Pinto, R. M. F. “Novas abordagens ao estudo de sinais biomédicos: Análise em tempo frequência e transformada de Hilbert-Huang” *Tese de doutorado*, Universidade de Lisboa, Portugal, 2009.
- Ramani, A. et al. “Finite element modeling of a refrigeration compressor for sound prediction purposes” *International Compressor Engineering Conference*, Paper 948, 1994.
- Rovaris, J. B. “Uma metodologia para a simulação numérica de compressores” *Dissertação de mestrado*, UFSC, Florianópolis, 2004.
- Sangoi, R. “Estudo e identificação de fontes de ruído e vibrações em um compressor hermético” *Dissertação de mestrado*, UFSC, Florianópolis, 1983.
- Silva, G. C. C. “Aplicação da técnica de ATVs visando redução do ruído irradiado por compressores herméticos preservando sua eficiência energética” *Monografia de graduação*, UnB, Brasília, 2014.
- Tojo, K. “Noise reduction of refrigerator compressors” *International Compressor Engineering Conference*, Paper 338, 1980.

7. DIREITOS AUTORAIS

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