

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA TRANSMISSÃO DE VIBRAÇÃO DE UMA VIGA COM RELAÇÃO A SUA GEOMETRIA.

Paulo Balduino Flabes Neto, pauloflabes@gmail.com
Marcus Antônio Viana Duarte, mvduarte@mecanica.ufu.br

Resumo: Este trabalho objetiva realizar uma análise de sensibilidade de uma viga afim de avaliar a alteração da transmissibilidade de vibração com a variação de sua forma geométrica. O estudo irá contribuir de forma primordial no desenvolvimento do trabalho de mestrado intitulado como QUANTIFICAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS CAMINHOS DE TRANSMISSÃO ESTRUTURAIS DE COMPRESSORES ALTERNATIVOS, o qual tem como objetivo final otimizar a geometria de um tubo metálico de maneira a reduzir a energia vibratória que é transmitida pelo mesmo. No presente trabalho foi utilizado um algoritmo que faz alterações na geometria da viga sem alterar seu comprimento inicial, assim este algoritmo permitiu que a análise de sensibilidade seja feita blocando o comprimento da viga. Em seguida avaliou-se a transmissibilidade de vibração utilizando a técnica de elementos finitos para três diferentes geometria através da comparação do espectro de frequência da transmissibilidade de cada. Observou-se alterações bastante significativas do espectro de frequência para cada geometria estudada, levando a concluir que pode-se alterar a transmissão de vibração de uma viga apenas alterando sua forma geométrica.

Palavras-chave: Analise de Sensibilidade, Elementos Finitos, Transmissão de Vibração

1. INTRODUÇÃO

O nível de ruído gerado por máquinas ou equipamentos é um problema que chama bastante atenção de engenheiros de projeto. Existe uma grande preocupação com a mitigação do ruído gerado por equipamentos e, para isto, existem várias medidas a serem tomadas.

A crescente necessidade de redução de ruído e vibração gerados por unidades de refrigeração faz reunir esforços para estudar sua principal fonte, o compressor.

Para melhor entender o mecanismo de geração de ruído deste equipamento pode-se dividir seus componentes em três categorias: fontes de energia, caminhos de propagação e irradiadores sonoros.

Desta forma, consideram-se os irradiadores sonoros como sendo os principais responsáveis pela irradiação de som do sistema e, portanto, a contribuição das demais categorias no ruído global é ignorada.

Vendo o sistema desta maneira, torna-se clara a ideia de que uma das melhores estratégias para atenuar o ruído consiste em minimizar o fluxo de energia que chega até os irradiadores através dos caminhos de propagação, segundo Da Silva [1].

O ruído irradiado pelo compressor está relacionado com o nível de vibração transmitido entre a bomba e a carcaça do mesmo, as quais estão conectadas através de quatro molas e uma serpentina, de acordo com a Fig. (1).

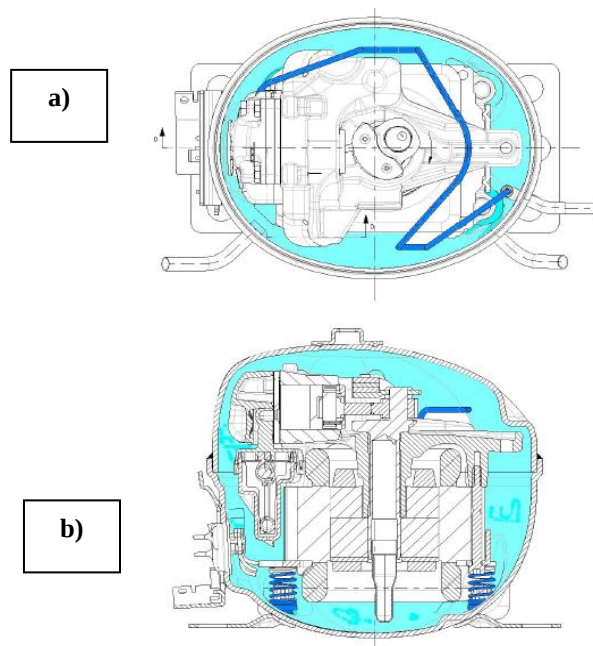


Figura 1. Vistas de corte (a) superior e (b) lateral de um compressor alternativo destacando os caminhos de transmissão, tubo de descarga e molas (Da Silva [1]).

Objetivando-se minimizar a transmissibilidade de tais elementos e assim melhorar a qualidade sonora dos compressores alternativos, o trabalho de mestrado QUANTIFICAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS CAMINHOS DE TRANSMISSÃO ESTRUTURAIS DE COMPRESSORES ALTERNATIVOS, propõe-se desenvolver uma metodologia para de otimização a fim de obter a melhor forma geométrica e as melhores propriedades mecânicas do tubo de descarga, de maneira a minimizar o fluxo de energia vibratória através da mesma.

Assim, o presente trabalho servirá como um estudo inicial para avaliar o comportamento da transmissão de energia vibratória através de um tubo, o qual aqui será modelado como uma viga, com relação à variação de sua forma geométrica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No mercado brasileiro e mundial encontra-se uma grande diversidade de tipos constitutivos e utilidades de compressores tais como: compressores alternativos, de palhetas, de parafuso, rotativos helicoidais, e centrífugos, os quais podem ser divididos ainda em hermeticamente e não hermeticamente selados, de pequeno e grande porte, e compressores de refrigeração e compressores de ar.

Uma vasta revisão bibliográfica, desde as primeiras conferências em Purdue até 1980, foi feita por Soedel [2] mostrando o estado da arte de trabalhos sobre ruídos e vibrações em compressores. Soedel [2] dividiu a vasta bibliografia em 4 categorias básicas, quais são: fontes geradoras de ruído; caminhos de transmissão; irradiação e análise e projeto do *muffler*.

Soedel [2] concluiu que a maioria dos trabalhos até então desenvolvidos eram baseados em estudos experimentais, faltando assim estudos fundamentados em desenvolvimento e modelamento matemáticos e em simulações computacionais apoiados paralelamente em experimentos controlados.

As duas regiões no espectro com maiores níveis de potência sonora irradiada (bandas de 500 Hz e 2.000 Hz) de compressores alternativos de refrigeração foram investigadas por Tojo [3]. Através de experimentos variando o tipo de gás e a temperatura deste na cavidade, e por consequência a velocidade do som neste meio, concluiu que as ressonâncias da cavidade proporcionam a principal fonte do ruído em torno de 500 Hz, gerada principalmente pela pulsação do gás no *muffler* de sucção e pela vibração do conjunto moto-compressor, que irradia ruído para a cavidade.

A irradiação de ruído na região de 2.000 Hz que é a mais importante do espectro destes compressores foi estudado por Tojo [3] através da medição da pressão do gás no cilindro e da vibração do conjunto moto-compressor, paralelamente à monitoração da abertura da válvula de descarga. Tojo [3] concluiu que a abertura da válvula de descarga provoca variações bruscas de pressão no cilindro, resultando em forças que excitam mecanicamente vibrações no conjunto moto-compressor, chegando à carcaça através das molas e tubo de descarga.

Utilizando-se de um modelo de sistema mecânico linear de múltiplas entradas e única saída, os caminhos de transmissão de energia vibratória de um compressor foram investigados até 5 kHz por Crain [4]. Um compressor

instrumentado com transdutores de pressão, na cavidade, e de força, nas molas, foi utilizado para tal estudo. Crain [4] concluiu, através da comparação do ruído predito sem o efeito de um dos caminhos, que as molas são os principais caminhos de transmissão de energia responsáveis pelo ruído acima de 800 Hz.

Um modelo de Elementos Finitos de um compressor hermético alternativo para propósitos de predição de ruído foi feito por Ramani [5]. O modelo da carcaça, feito com elementos de placa, foi reformulado várias vezes na sua espessura e densidade de malha até a validação através da comparação das frequências e modos extraídos por análise modal experimental na região abaixo de 2 kHz. Erros menores que 5% entre as frequências naturais, respectivamente correlacionadas, foram conseguidos. O procedimento experimental de Ramani para a obtenção dos modos consistia em excitar harmonicamente a carcaça com um excitador eletro-dinâmico nas frequências naturais e por meio de um vibrômetro a laser extrair os modos. Assim, os modos obtidos são mais próximos dos verdadeiros, quais são os que a estrutura vibra quando em operação. O conjunto moto-compressor foi modelado como um corpo rígido através de um elemento pontual de massa com iguais propriedades de massa e inércia, e o tubo de descarga modelado com elementos de viga.

Crucq [6] descreve modelos analíticos relacionados às principais fontes geradoras de ruído e vibrações em compressores herméticos. Após extenso trabalho experimental, o autor lista as principais fontes de ruído, por ele encontradas:

- a) irradiação do muffler de sucção para a cavidade.
- b) vibrações do sistema pistão/biela/eixo, excitado pela pressão exercida pelo gás durante a descarga.

Um estudo da transmissibilidade e principais esforços transmitidos pelo conjunto de suspensão à carcaça de um compressor hermético nas regiões de alta e baixa frequência e sua influência na potência sonora irradiada por este foram feitos por Bastos [7]. Bastos mostrou que decréscimos nos níveis de potência sonora irradiada pelo compressor podem ser conseguidos com o aumento do amortecimento do sistema de suspensão do bloco, resultando, assim, em significativa redução dos níveis de excitação da carcaça.

Segundo um trabalho feito por Diesel [8], a parcela do ruído global referente às altas frequências, principalmente nas faixas entre 6 kHz e 10 kHz, está correlacionada com a capacidade do tubo de descarga em transmitir a energia vibratória para a carcaça nesta região do espectro.

Muitas pesquisas têm se concentrado no sentido de desenvolver metodologias que possibilitem o projeto de geometrias com capacidade de filtragem do fluxo de energia em faixas de frequência específicas e que, ao mesmo tempo, sejam robustas e possam ser aplicadas numa ampla gama de problemas de vibrações e acústica. A ideia de se criar estruturas com essas características surgiu a partir do estudo das estruturas periódicas realizado por Mead [9]. Estruturas com periodicidade geométrica comportam-se como filtros *band stop* em regiões do espectro onde as mesmas não possuem frequências naturais, fazendo com que as ondas que se propagam nesta faixa sejam atenuadas por reflexão destrutiva.

As modificações geométricas atenuam o fluxo de energia de duas maneiras. Na primeira, pelo deslocamento das ressonâncias para fora da região de otimização e, na segunda, pela anulação das ressonâncias através do alinhamento dos modos segundo Mead [9].

Trabalhos como ao de Anthony [10] mostram que não é possível observar padrões geométricos de estruturas otimizadas em faixas de frequência contendo mais do que um modo de vibração. Isto acontece devido às inúmeras interações complexas que ocorrem simultaneamente para que a atenuação seja alcançada.

Assim, este trabalho tem como objetivo estudar a importância das molas e da serpentina como caminho de transmissão de energia vibratória para a carcaça usando como ferramenta simulação numérica por elementos finitos e técnicas de otimização.

3. METODOLOGIA

O problema proposto por este trabalho será abordado através de uma modelagem numérica via Métodos dos Elementos Finitos (MEF) da serpentina, a qual aqui será modelada como uma viga simples engastada-livre.

Após modelagem, será feita uma análise de sensibilidade com relação à geometria da viga, a fim de avaliar as variações que ocorrem na transmissibilidade de energia vibratória através da mesma. Sabe-se do estudo da teoria de vibrações mecânicas de estruturas, que no caso de uma viga, a alteração de comprimento implica na modificação de seu comportamento dinâmico, variando dessa forma os resultados de transmissibilidade de energia através da mesma. Como o objetivo deste trabalho é realizar uma análise de sensibilidade somente em relação à alteração de sua forma geométrica, a qual não inclui a variação de comprimento, foi necessário criar uma rotina de otimização em linguagem MATLAB para que fosse possível criar várias formas diferentes de formas sem a alteração do comprimento da mesma.

Esta rotina consiste em alterar o posicionamento de pontos que controlam a forma geométrica da viga, aqui chamados de pontos de controle mantendo o comprimento da viga. Através destes pontos de controle é aplicado uma interpolação do tipo *spline* para criar a linha base onde a viga será construída. O comprimento da viga é de 0,5 m e inicialmente se encontra totalmente reta. Os pontos de controle 1 e 4 são sempre fixos nas coordenadas (0,0) e (0,3,0), por outro lado, os pontos 2 e 3 são movidos na coordenada *y* e permanecem sempre nas coordenadas *x* igual a 0,1 e 0,2 respectivamente. Na Fig. (2) é apresentado a viga e os pontos de controle descritos acima.

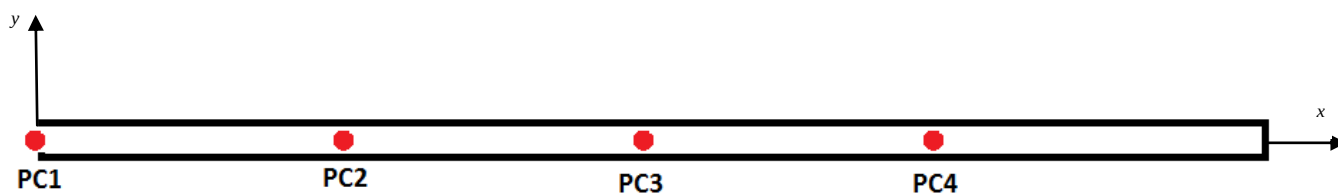


Figura 2. Localização dos pontos de controle ao longo da viga.

Portanto a rotina de otimização busca a posição dos pontos de controle 1 e 3 no eixo y de tal maneira que a interpolação dos pontos de 1 a 4 gere uma linha com comprimento de 0.5 m.

Um estudo sobre o espaço de busca desse algoritmo foi feito afim de visualizar os pontos solução deste problema, assim os postos de controle 2 e 3 foram movidos sistematicamente de -0.3 a 0.3 m em intervalos de 0.01m e em seguida calculou-se o comprimento da linha de interpolação destes pontos.

Na Fig. (3) é mostrado o espaço de possíveis soluções para o comprimento da interpolação dentro do intervalo de variação dos pontos de controle de -0.3 a 0.3 m.

Observa-se que existe um plano paralelo ao plano xy e na altura de 0.5 m no eixo z que intercepta a superfície gerada formando uma elipse de intersecção entre os mesmos, esta elipse formada contém os pontos de deslocamentos dos PC2 e PC3 que resultam em uma linha de interpolação de comprimento 0.5 m, ou seja, esta elipse contém o espaço de possíveis soluções do problema de manter o comprimento da viga fixo.

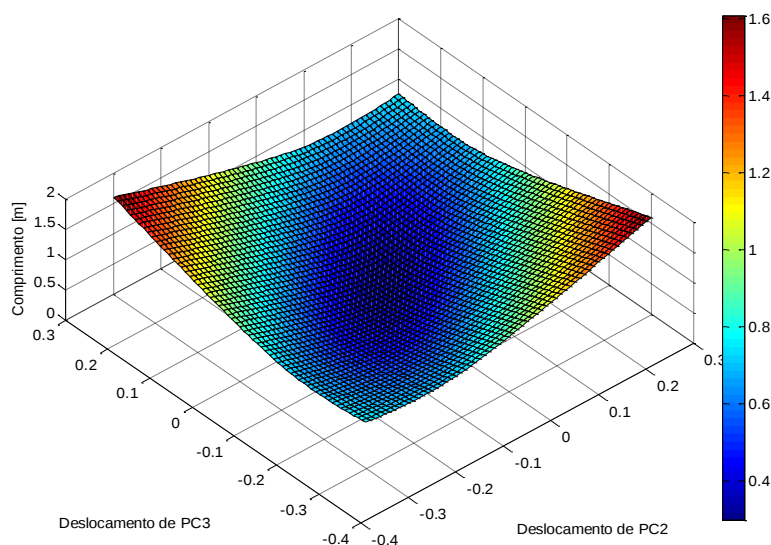


Figura 3. Espaço de busca da rotina de otimização do comprimento da viga.

O algoritmo tem como saída os deslocamentos de PC2 e PC3 permitidos para não alterar o comprimento da viga.

Em seguida, estes deslocamentos são aplicados em um modelo de Elementos Finitos de uma viga engastada-livre para gerar uma nova forma geométrica para a mesma. No modelo é aplicado uma força unitária na direção y posicionada próximo a extremidade engastada, e então mede-se o deslocamento resultante nas três direções na outra extremidade da viga.

Calcula-se por fim a Função Transferência entre a força aplicada e o deslocamento medido na banda de frequência de 0 a 3000 Hz. Os espectros da Função Transferência para cada forma geométrica da viga são comparados a fim de avaliar alguma alteração no mesmo.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

A transmissibilidade de energia vibratória da viga foi analisada para três diferentes formas geométricas, a primeira é a viga totalmente reta (Forma 1), apresentada na Fig. (4-a), a segunda (Forma 2) e a terceira (Forma 3) forma são apresentadas nas Fig. (4-b) e Fig. (4-c) respectivamente, estas duas últimas foram obtidas através da rotina de otimização dos pontos de controle.

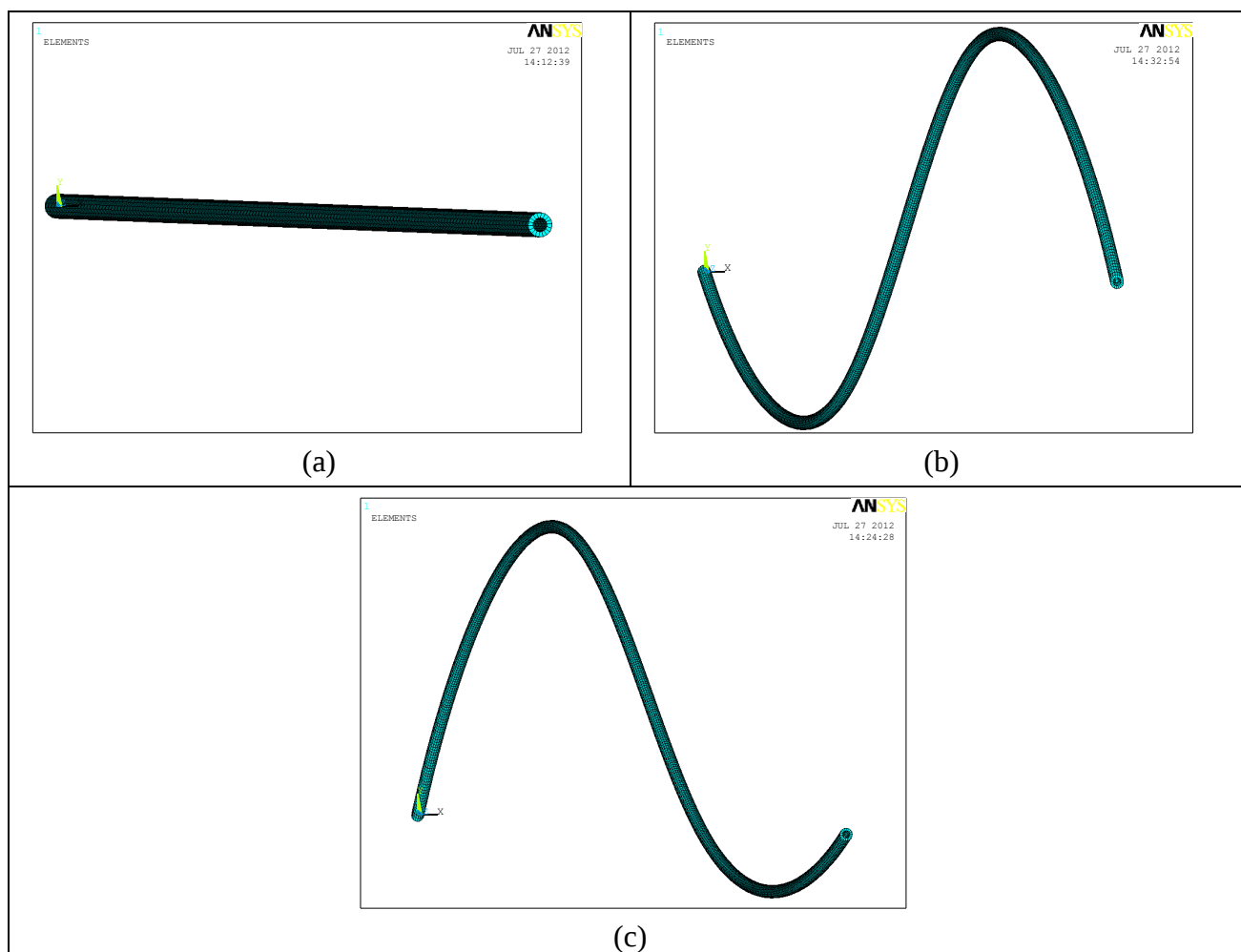


Figura 4. Formas geométricas estudadas, (a) Forma 1, (b) Forma 2, (c) Forma 3.

Os espectros de transmissibilidade para as três formas geométricas são apresentados na Fig. (5). Analisando a Fig. (5) observa-se uma alteração total da transmissibilidade com a mudança da forma da viga. Esta alteração se dá primeiramente no número de modos observados, na Forma 1 observa-se 12 modos de vibração da viga, por outro lado nas formas 2 e 3 observa-se 17 e 16 modos respectivamente.

Porém, a alteração mais importante, considerando os objetivos finais da dissertação de mestrado, é a alteração da amplitude de transmissibilidade para as três formas geométricas, ou seja, apenas alterando a forma geométrica da viga consegue-se variar o nível de energia vibratória transmitida pela viga. Isso nos mostra indícios de que existe uma forma ótima que minimize a transmissão de energia através da mesma.

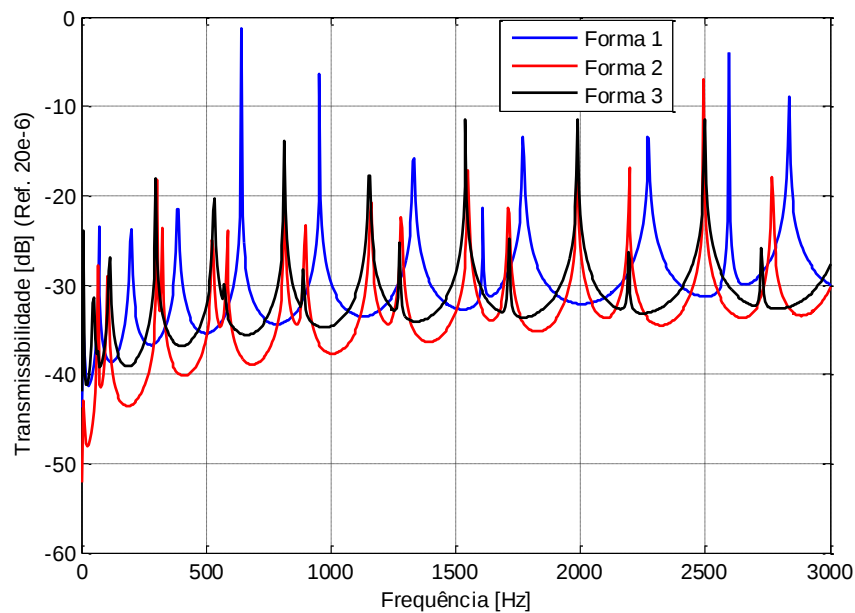


Figura 5. Espectro de Transmissibilidade para as três formas geométricas estudadas.

A fim de comparar em termos numéricos a variação de transmissibilidade com a mudança da forma, calculou-se a Densidade Espectral de Potência (DEP) para os três espectros, esse parâmetro mede a energia contida em cada espectro, apresentando uma estimativa de qual das três formas transmite menos energia vibratória. Na Tab. (1) é mostrado a DEP para as Formas 1 a 3.

Tabela 1. Densidade Espectral de Potência para cada forma.

Forma	DEP [dB]
1	-47,9
2	-60,7
3	-63,9

Analisando a Tabela 1 observa-se que também houve uma alteração na energia de vibração transmitida pela viga em função da alteração da geometria da mesma.

Pesquisando em alguns artigos relacionados com este assunto, as modificações geométricas atenuam o fluxo de energia de duas maneiras. Na primeira, pelo deslocamento das ressonâncias para fora da região de otimização e, na segunda, pela anulação das ressonâncias através do alinhamento dos modos, ou seja, a viga funciona como um filtro mecânico de vibração.

O próximo passo deste trabalho será encontrar a forma ótima para esta viga que minimize a transmissão de energia através da mesma.

5. CONCLUSÕES

O algoritmo de otimização do comprimento da serpentina foi parte indispensável para o estudo de sensibilidade, ele permitiu a criação das duas formas geométricas deformadas da viga sem a alterar o comprimento da mesma, sendo assim a análise feita apenas na variação de sua forma.

As três formas geométricas estudadas resultaram em espectros de transmissibilidade bastante distintos, evidenciando a alteração do nível de amplitude dos mesmos, os quais são de extrema importância para os trabalhos futuros da dissertação de mestrado. Esta variação de amplitude foi confirmada pelo cálculo da Densidade Espectral de Potência, observando variações de até 16 dB na energia contida na banda.

Por fim, após análise dos resultados, pode-se concluir que a alteração da forma geométrica de uma viga, mantendo todos os outros parâmetros constantes, pode ser utilizada como uma maneira de reduzir os níveis de vibração transmitidos pela mesma, sendo interessante para tal fim, a obtenção da geometria ótima que minimize a energia transmitida, esse será a próxima etapa a ser feita.

6. REFERÊNCIAS

- [1] DA SILVA, A. R., Minimização do Fluxo de Potência Através do Tubo de Descarga de Compressores Herméticos, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis - SC 2004.
- [2] SOEDEL, W., ROYS, B., On the Acoustics of Small High Speed Compressors : A Review and Discussion, Noise Control Engineering Journal, Vol. 32, 1989, pg 25.
- [3] TOJO, K. ,SAEGUSA, S., SUDO, M., TAGAWA, S., Noise Reduction of Refrigerator Compressors, Proceedings of 1980 Purdue Compressor Thecnology Conference, 1980, pg 235.
- [4] CRAUN, M. A. , MITCHELL, L. D., Identification of Sound Propagation Paths within a Reciprocating Compressor via Mutltiple-input/Single-output Modeling, Proceedings of the 1994 International Compressor Engineering Conference at Purdue, 1994, pg 1.
- [5] RAMANI, A., ROSE, C., KNIGHT, C. E., MITCHELL, L. D., Finite Modeling of a Refrigeration Compressor for Sound Prediction Purposes, Proceedings of the 1994 International Compressor Engineering Conference at Purdue, 1994, pg 7.
- [6] CRUCQ, J., Modelling of Noise Sources in Refrigerant Compressors, InterNoise 88, pg. 817.
- [7] BASTOS, A. A.; Isolamento de Vibrações em Alta Frequência em Sistemas com Múltiplos Graus de Liberdade, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis - SC 1984.
- [8] DIESEL, F. N. Fluxo de Energia do Conjunto Interno Motor-Compressor para a Carcaça de um Compressor Hermético Através da Cavidade, Dissertação de Mestrado, UFSC, Maio, 2000.
- [9] MEAD, D. J. e BARDELL, N. S. Free Vibration of a Thin Cylindrical Shell with Periodic Circunferencial Stiffners, Journal of Sound and Vibration, 1987, vol. 115(3), 449-520.
- [10] ANTHONY, D. K., ELLIOT, S. J. e KEANE, A. J., Robustness of Optimal Design Solutions to reduce Vibration Transmission in a Lightweight 2-D Structure. Part I: Geometric Design, Journal of Sound and Vibration, 2000, vol. 229(3), 505-528.