

## CONTROLE DE RUÍDO EM AR COMPRIMIDO

Júlia Bertelli Duarte, juliabduarte@gmail.com<sup>1</sup>

Marlipe Fagundes Garcia Neto, marlipeg@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Ricardo Humberto de Oliveira Filho, rholiveira@mecanica.ufu.br<sup>1</sup>

Marcus Antonio Viana Duarte, mvduarte@mecanica.ufu.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica

Av. João Naves de Ávila, 2121 Bl.1M – Campus Sta Mônica - Uberlândia-MG – 38400-902

**Resumo:** A utilização de ar comprimido para limpeza e secagem de peças é muito comum em qualquer parque industrial. Por outro lado, os níveis de ruído medidos no ouvido do operador alcança facilmente valores acima de 100 dB(A). Neste trabalho, é utilizada uma metodologia baseada em superfície de resposta RSM para estudar o efeito que os parâmetros números de furo (mesma área aberta) e distância entre fluxo e a superfície refletora têm sobre os níveis de pressão sonora NPS ( $L_{Aeq}$ ) medidos no ambiente. A metodologia utilizada foi a de Box-Behnker com quatorze réplicas no ponto central e uma réplica nos outros pontos para avaliação do erro puro. Da análise de variância (ANOVA), o melhor modelo ajustado foi o modelo linear. A inclinação do plano gerado pela RSM mostra que o número de furos tem mais influência nos níveis de ruído gerado pelo ar comprimido do que a distância entre o ar comprimido e a superfície refletora. Numericamente, tem-se uma diminuição média de 9,3 dB(A) quando aumenta-se o número de furos de 1 para 16 e uma queda de 1,4 dB(A) quando aumenta-se a distância de 8 para 49 mm.

**Palavras-chave:** ruído em ar comprimido, superfície de resposta, controle de ruído.

### 1. INTRODUÇÃO

Sistemas pneumáticos são de grande utilidade nas indústrias possuindo uma multiplicidade de funções relacionadas à transferência de massa ou energia em um processo de trabalho e peças, principalmente quando se necessita de esforços moderados a grandes velocidades, ambientes limpos, ou quando o ambiente é inflamável ou hostil. Diversos trabalhos têm como objeto de estudo a utilização do ar comprimido, analisando a sua propagação em tubulações e o ruído gerado em sua descarga. Por outro lado, encontram-se poucos estudos sobre ruído gerado pelos mesmos.

Cada tipo de equipamento ou elemento de máquina possui uma fonte geradora de ruído inerente às suas características mecânicas e dinâmicas, e um dos grandes desafios é a caracterização e classificação destes como fontes de ruído. O ruído produzido pela atividade fabril, por exemplo, afeta de diversos modos o ambiente industrial.

As descargas de grandes volumes de gás a altas pressões para a atmosfera são caracterizadas como um dos principais elementos de ruído encontrados nas plantas industriais. Estas são derivadas de válvulas de alívio que descarregam fluidos em alta velocidade para atmosfera ou para um meio de menor pressão, gerando ruído associado a diferentes mecanismos termos-fluídos atuando simultaneamente. Observa-se que em indústrias é normal a utilização de ar comprimido para limpeza de peças e estas operações são sempre muito ruidosas (de 95 a 105 dB(A) a um metro de distância). O ruído de ar comprimido industrial é considerado a segunda fonte responsável pelo alto índice de perda auditiva, sendo excedido somente pelo ruído de impacto de máquinas e ferramentas (Gerges, 2000).

O entendimento dos mecanismos de geração de ruído aerodinâmico está relacionado, dentre outros fatores, à investigação da variação no número de Mach no escoamento principal, à caracterização de escoamentos subsônicos e supersônicos, bem como aos tipos de radiações aerodinâmicas: monopolo, dipolo e quadripolo (Beranek, 1992). A radiação sonora de um dipolo ocorre quando um fluxo de gás interage com um corpo produzindo forças não estacionárias. Já a radiação aerodinâmica de um quadripolo resulta das tensões viscosas em um fluxo de gás turbulento, na ausência de interação com corpos sólidos. As fontes quadripolo aerodinâmicas constituem o tipo dominante de fontes em alta velocidade subsônica e de jatos turbulentos (Gerges, 2000).

O controle do ruído é parte integrante do programa de conservação de audição, atuando diretamente na redução de ruído na fonte, na trajetória de propagação através do bloqueio e redução da energia sonora, ou no receptor através de seu isolamento. O processo de atenuação sonora é dado pela perda de energia acústica de um feixe de som. A atenuação pode ser dividida em duas partes: mecanismos de absorção que convertem energia acústica em energia térmica e em mecanismos que refletem ou difundem energia para fora do feixe (Kinsler, 1982). A solução adotada como medida de

controle pode ser dada por uma atuação combinada de vários recursos, viabilizando com as características da fonte e instalação.

A complexidade dos mecanismos de geração de ruído torna essencial o emprego de modelos numéricos e experimentais para o desenvolvimento de dispositivos de controle eficazes. Na maioria das situações de interesse prático prevalece no escoamento um comportamento caótico de grande complexidade, envolvendo fenômenos pertinentes a escoamentos subsônicos e supersônicos como compressibilidade, turbulência e ondas de choque.

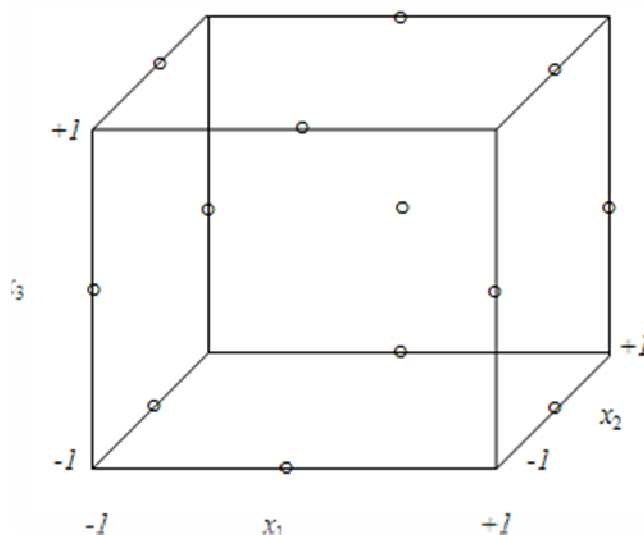
A Metodologia de Superfície de Resposta – RSM – é uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais que foi introduzida por G. E. P. Box nos anos 1950, e que desde então tem sido usada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais (Barros Neto et. al., 2001). É composta por planejamento e análise de experimentos, que procura relacionar respostas com os níveis de fatores quantitativos que afetam essas respostas (Box e Draper, 1987).

O objetivo deste trabalho é analisar, via metodologia da superfície de resposta, a influência de dois parâmetros (número de furos e distância em relação a uma barreira) no ruído gerado por um escape de ar comprimido.

## 2. METODOLOGIA

Este trabalho consiste em avaliar a influência dos parâmetros número de furos e distância entre o tubo e uma barreira no ruído gerado por vazamentos de ar comprimido.

A metodologia, então, consiste em utilizar um delineamento experimental de Box-Behnken baseado em superfície de resposta (RSM) cúbica centrada com alfa igual a 1. (Hines et. al., 2005). Geometricamente, o delineamento é mostrado pela Fig. (1).



**Figura 1. Representação geométrica do delineamento de Box-Behnken.**

E, para avaliar o erro puro, foram realizadas quatorze (14) réplicas no ponto central e uma réplica para os todos os outros tratamentos.

## 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi realizado um experimento para ver o comportamento do ruído em ar comprimido. A bancada experimental é mostrada pela Fig. (2). Os tubos foram conectados a uma rede de ar comprimido e colocados sobre uma mesa metálica para que o ruído gerado fosse mais alto que o ruído de fundo. Foram realizadas três medições de níveis de pressão sonora ( $L_{Aeq} - 1$  minuto) por ensaio em dez pontos localizados à uma distância de um metro do aparato experimental, em conformidade com a ISO 3745-2003 (Fig. (3)). Para cada ensaio, esperava-se o desligamento do compressor para garantir que o reservatório estivesse completamente cheio visando a bloqueio do efeito da pressão de descarga do ar.



Figura 2. Aparato experimental.

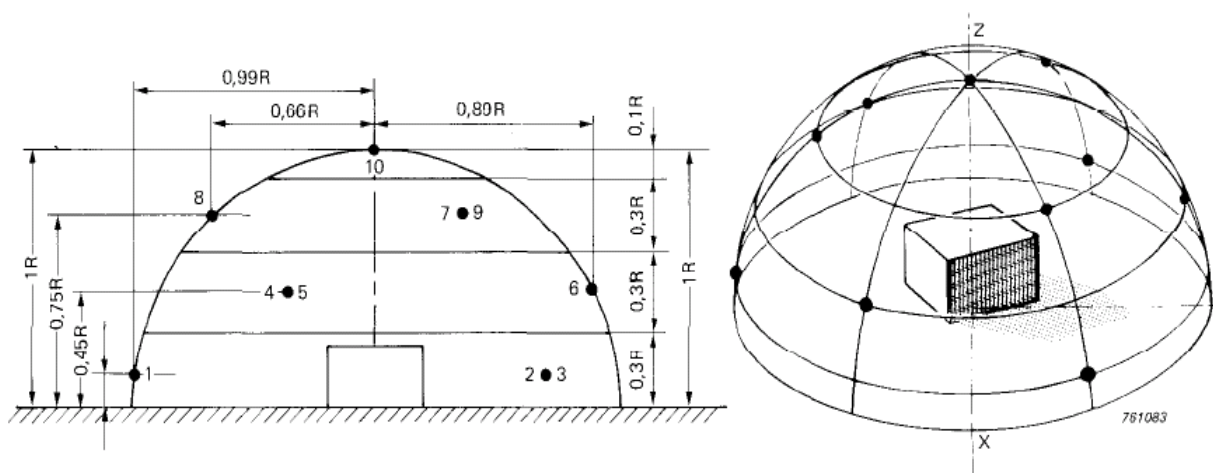


Figura 3. Posições de microfone, recomendadas pela ISO 3745, na superfície de um hemisfério .

Os níveis utilizados para o fator altura foram 8, 34 e 49 milímetros, respectivamente, as quais normalizadas no intervalo  $[-1 +1]$  resultam nos valores  $-1, 0,27$  e  $+1$ , respectivamente. Na Fig. (4) são mostrados os dispositivos utilizados para garantir a repetibilidade do fator altura.

Para o fator número de furos foram utilizadas três configurações de tubos com 1, 4 e 16 furos, que resultaram nos níveis normalizados de  $-1, 0,6$  e  $+1$ , respectivamente. Os diâmetros e números de furos foram escolhidos de maneira a garantir uma área aberta total de  $31,67 \text{ mm}^2$ , para cada configuração. Na Fig. (5) são mostrados os três tubos de PVC, com os respectivos furos, utilizados na experimentação.

Para as medições dos Níveis de Pressão Sonora NPS, utilizou-se um decibelímetro Larson Davis SoundTrack<sup>TM</sup> LxT1 (certificado de calibração 0102/08) previamente calibrado, medindo-se o valor de  $L_{Aeq}$  durante 1 minuto para cada um dos doze pontos de medição do hemisfério virtual mostrado na Fig. (3). Não foi necessário descontar o efeito do ruído de fundo, uma vez que em todas as medições de  $L_{Aeq}$  realizadas, o nível do ruído de fundo era inferior a  $10 \text{ dB(A)}$  com relação aos valores medidos com o aparato experimental em funcionamento.

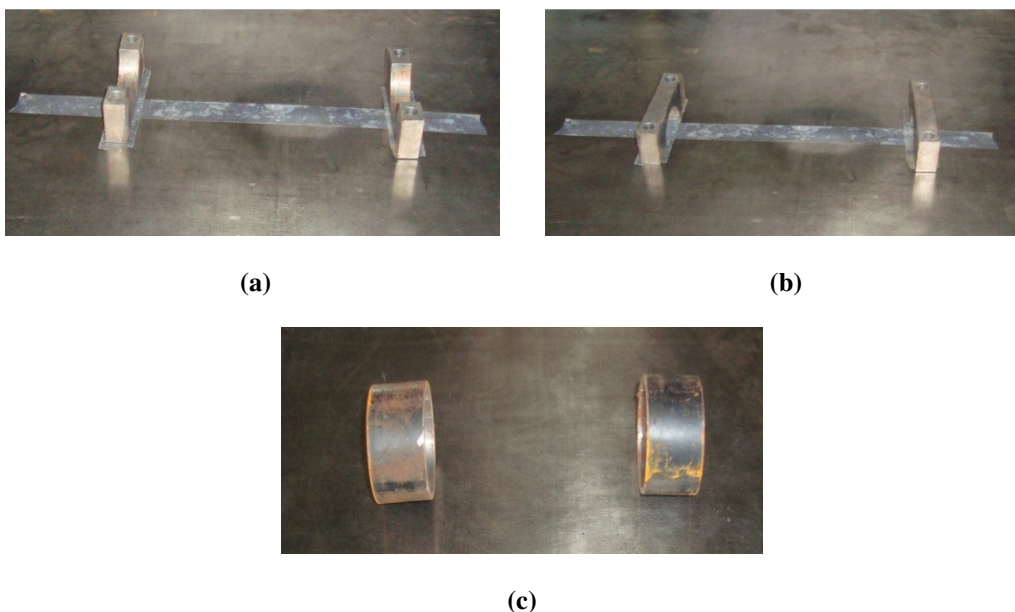


Figura 4. Alturas utilizadas no experimento: (a) 8 mm; (b) 34 mm; (c) 49 mm.



Figura 5. Tubos utilizados para realização do experimento.

A ordem dos ensaios foi realizada de forma aleatória, conforme seqüência mostrada na Tab. (1). Na tabela também é mostrado o número de furos e distância normalizados para cada um dos 15 tratamentos.

Tabela 1. Ensaios realizados apresentados de forma normalizada.

| Ensaio | Furo | Distância |
|--------|------|-----------|
| 1      | 0,6  | 0,27      |
| 2      | -1   | +1        |
| 3      | 0,6  | 0,27      |
| 4      | -1   | 0,27      |
| 5      | 0,6  | 0,27      |
| 6      | 0,6  | 0,27      |
| 7      | 0,6  | +1        |
| 8      | -1   | -1        |
| 9      | 0,6  | 0,27      |
| 10     | 0,6  | 0,27      |
| 11     | 0,6  | 0,27      |
| 12     | +1   | -1        |
| 13     | 0,6  | -1        |
| 14     | +1   | 0,27      |
| 15     | +1   | +1        |

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A modelagem, na metodologia de superfícies de resposta, é feita ajustando-se modelos simples a respostas obtidas com planejamentos fatoriais (Barros Neto et. al., 2001). Os modelos, em geral, são simples e limitados pelo grau de liberdade do sistema.

Neste trabalho, o sistema possui nove (9) graus de liberdade, portanto, um modelo cúbico não é possível. Assim, modelos quadráticos e lineares foram admitidos para análise. Suas respostas podem ser estimadas utilizando as Eq. (1) e Eq. (2), respectivamente.

$$\hat{y} = f_0 + f_1x_1 + f_2x_2 + f_3x_1x_2 + f_4x_1^2 + f_5x_2^2 \quad (1)$$

$$\hat{y} = f_1x_1 + f_2x_2 + f_3x_1x_2 \quad (2)$$

onde  $f_0, f_1 \dots f_5$  são os parâmetros dos modelos, e  $x_1$  e  $x_2$  representam os fatores parametrizados.

Os parâmetros  $f_0, f_1 \dots f_5$  foram estimados via Mínimos Quadrados (MQM). Assim, os valores de NPS podem ser estimados utilizando a Eq. (3) para um modelo quadrático ou a Eq. (4) para um modelo linear.

$$\hat{y} = 68,86 - 4,72x_1 - 0,74x_2 - 1,35x_1x_2 + 0,78x_1^2 - 0,58x_2^2 \quad (3)$$

$$\hat{y} = 69,1 - 4,65x_1 - 0,69x_2 - 1,35x_1x_2 \quad (4)$$

onde  $\hat{y}$  é o valor de NPS previsto pelo modelo.

Se o valor de NPS obtido experimentalmente for  $y$ , o resíduo observado é calculado conforme a Eq. (5).

$$e = y - \hat{y} \quad (5)$$

Para o modelo quadrático, o resíduo calculado foi de 86,43. Já para o modelo linear, o resíduo vale 88,53.

Como os resíduos deram valores muito próximos, fez-se um teste de hipótese nula para avaliar se os coeficientes quadráticos servem apenas para modelar o erro experimental. Como a hipótese foi aceita, fez-se a análise apenas para o modelo linear.

Admitindo uma distribuição normal, pode-se obter o intervalo de segurança dos coeficientes, mostrados na Tab. (2).

**Tabela 2. Intervalo de segurança dos coeficientes lineares.**

| Intervalo de segurança, com 90% de confiança |       |
|--|-------|
| 68,55  | 69,65 |
| -5,34  | -3,95 |
| -1,45  | 0,07  |
| -2,21  | -0,48 |

Os coeficientes lineares calculados estão todos dentro do seu respectivo intervalo, e, dessa forma, são estatisticamente significativos.

A análise do resíduo do modelo é fundamental para avaliar a qualidade do ajuste. Em geral, o método mais utilizado para determinar o erro é a Análise da Variância (ANOVA). Os resultados da ANOVA para o modelo linear estão mostrados na Tab. (3).

**Tabela 3. Análise de variância para o modelo da Eq. (2) aos dados da Tab. (1).**

| Fonte de variação                      | Soma Quadrática | N° de g.l. | Média Quadrática |
|--|-----------------|------------|------------------|
| <b>Regressão</b>                       | 351,71          | 3          | 117,24           |
| <b>Resíduos</b>                        | 88,53           | 26         | 3,40             |
| <b>Falta de ajuste</b>                 | 14,61           | 5          | 2,92             |
| <b>Erro puro</b>                       | 73,91           | 21         | 2,36             |
| <b>Total</b>                           | 440,24          | 29         | -                |
| <b>% de variação explicada</b>         |                 | 79,89%     |                  |
| <b>% máxima de variação explicável</b> |                 | 83,21%     |                  |

Além das porcentagens de variação explicada e máxima variação explicável estarem coerentes, a razão  $MQ_{fij}/MQ_{ep}$  é igual a 1,24 e adotando-se um intervalo de confiança de 90% para a hipótese de que o modelo é

satisfatório tem-se  $F_{0,9,3,26}$  igual a 2,61, ou seja: a hipótese é aceita e portanto o modelo linear ajustado descreve satisfatoriamente a superfície de resposta na região analisada.

A Eq. (4) define o plano representado em perspectiva na Fig. (6), e as curvas de nível na Fig.(7).

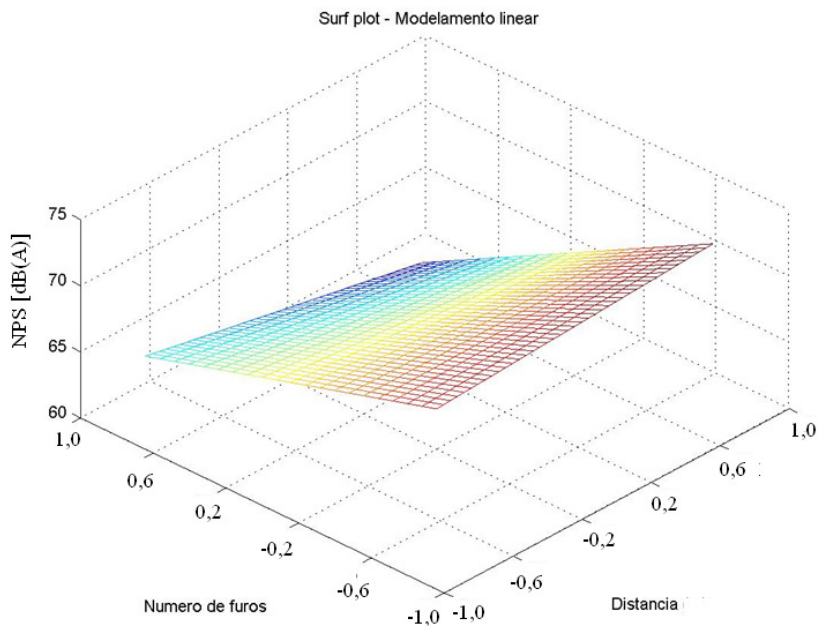


Figura 6. Plano gerado pela superfície de resposta.

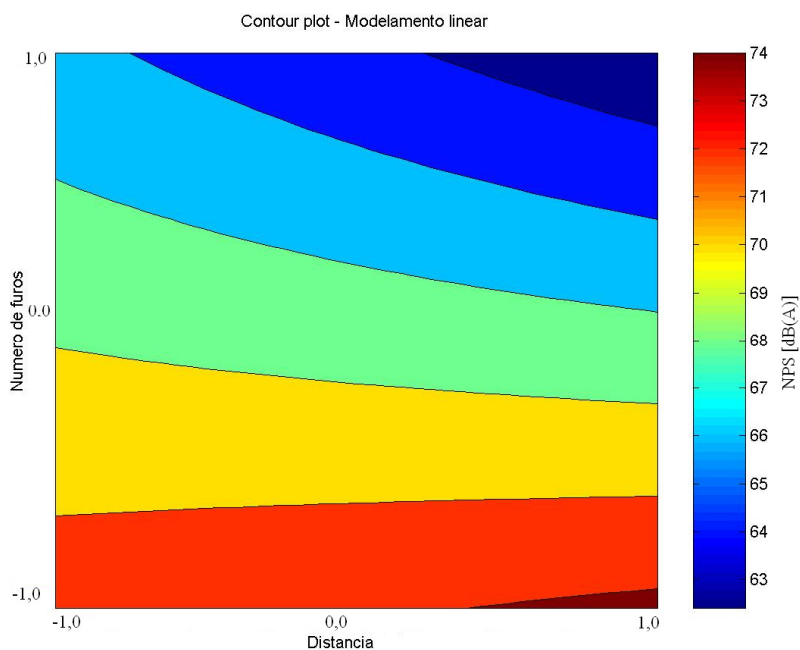


Figura 7. Curva de nível da RMS.

Da análise das figuras, observa-se que quanto maior o numero de furos e maior distância, menor será o valor do NPS (dBA). Numericamente, tem-se uma diminuição média de 9,3 dB(A) quando aumenta-se o número de furos de 1 para 16 e uma queda de 1,4 dB(A) quando aumenta-se a distância de 8 para 49 mm.

## 5. CONCLUSÕES

As principais conclusões tiradas deste trabalho são:

- estatisticamente, o modelo linear equaciona, de maneira satisfatória, o comportamento do NPS em função do número de furos e da distância do fluxo de ar comprimido da superfície, para o experimento realizado;
- a inclinação do plano gerado pela RSM mostra que o número de furos tem mais influência nos níveis de ruído gerado pelo ar comprimido do que a distância entre o ar comprimido e a superfície refletora. Numericamente, tem-se uma diminuição média de 9,3 dB(A) quando aumenta-se o número de furos de 1 para 16 e uma queda de 1,4 dB(A) quando aumenta-se a distância de 8 para 49 mm;
- portanto, para o estudo realizado, o valor mínimo da superfície de resposta seria de 64 db(A) para o número de furos igual a 16 a uma distância de 15,5 mm.

## 6. AGRADECIMENTOS

- À FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa “Identificação de Fontes Sonoras para Fins de Controle de Ruído Ambiental”.
- Ao projeto REGAP/FAU pela bolsa de Iniciação Científica.

## 7. REFERÊNCIAS

- Barros Neto, B., Scarminio, I. S., Bruns, R. E., “Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria” Editora da Unicamp, Campinas, SP, 401p., 2001.
- Beranek, L. L.; “Noise and vibration control engineering: Principles and applications” John Wiley & Sons, Inc. Canada. 1992.
- Box, G. E. P., Draper, N. R. “Empirical model building and response surfaces” J. Wiley, New York, 669p., 1987.
- Gerges, S. N. Y.; “Ruído Fundamentos e Controle” 2ª Edição, Florianópolis-SC-Brasil, 2000.
- Hines, W. W., Montgomery, D. C., Goldsman, D. M., Borror, C. M., “Probabilidade e Estatística na Engenharia” 4ª Ed, Editora LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 588p., 2006.
- ISO 3745:2003, “Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure -- Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms”, 2003.
- Kinsler, L. E.; Frey, A. R.; Coppens, A. B.; Sanders, J. V.; “Fundamentals of acoustics” 3ª Edição. John Wiley & Sons, Inc. Canada. 1982.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

# NOISE CONTROL IN COMPRESSED AIR

Júlia Bertelli Duarte, juliabduarte@gmail.com<sup>1</sup>

Marlipe Fagundes Garcia Neto, marlipeg@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Ricardo Humberto de Oliveira Filho, rholiveira@mecanica.ufu.br<sup>1</sup>

Marcus Antonio Viana Duarte, mvduarte@mecanica.ufu.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica  
Av. João Naves de Ávila, 2121 Bl.1M – Campus Sta Mônica - Uberlândia-MG – 38400-902

**Abstract:** *The use of compressed air for cleaning and drying parts is very common in any industrial park. Furthermore, the noise levels measured in the operator's ear easily reaches values above 100 dB (A). In this work a methodology is presented based on response surface to study the effect of the parameteres hole number (with the same open area) and distance between flow and reflective surface has on the sound pressure levels SPL measured in the environment. The methodology used was Box-Behnke Methodology with fourteen replicas at the center point and a replica of the other points to evaluate the pure error. Using Analysis of variance (ANOVA), the best fitted model was the linear one. The angle of the plane generated by RSM shows that the number of holes has more influence on noise levels generated by the compressed air than the distance between the air and the reflecting surface. Numerically, there was an average fall of 9.3 dB (A) with the increase of holes number of 1 to 16, and a decrease of 1.4 dB (A) with the increase of the distance of 8 to 49 mm .*

**Keywords** jet noise, response surface, noise control.