

CÁLCULO DE DOSE DE EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL EM UMA FÁBRICA

Déborah Aparecida Souza dos Reis¹; deborah.reis@uemg.br

Jorge von Atzingen dos Reis²; jorgereis@ufu.br

Marcus Antonio Viana Duarte³; mvduarte@ufu.br

¹UEMG; ²UFU; ³UFU

Resumo: O objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia de cálculo da dose de exposição ocupacional para inspetores e lubrificadores em unidades fabris. A dosimetria estuda, identifica e qualifica a magnitude do risco físico ruído como potencial causa de doença ocupacional. A exposição contínua a altos níveis de ruído pode ocasionar diversos efeitos sobre a saúde e qualidade de vida dos trabalhadores em uma fábrica, como por exemplo, a sobrecarga no coração, estresse, fadiga e aumento na quantidade de acidentes numa linha de produção e a ocorrência da PAIRO (Perda Auditiva Induzida por Ruído). As empresas e universidades estão trabalhando em projetos para desenvolver soluções acústicas a nível industrial para reduzir falhas, acidentes e a própria PAIRO, o que pode custar vidas. As normas vigentes possibilitam uma avaliação do grau de exposição atual e uma correção posterior. A ideia desta pesquisa é realizar simulações com os valores das doses de exposição conforme a rota de cada inspetor. Dessa forma, será possível calcular a exposição antes que ela ocorra. No caso os gestores dessas fábricas poderão tomar a melhor decisão optando por uma rota de inspeção com menor grau de exposição e utilizando as soluções acústicas para isso. Pode-se concluir que o modelo é robusto e eficiente para resolver o problema. Dentre os resultados pode-se citar os valores de dose de 0,17 e distância percorrida de 76 m, o que comprova a viabilidade do método matemático desenvolvido.

Palavras-chave: Modelagem; PAIRO; Inspeção.

1. Contextualização, objetivo e justificativa

A dosimetria é um ramo da ciência acústica que objetiva identificar e qualificar a magnitude do risco físico ruído como potencial causa de doença ocupacional. Dessa forma, utiliza-se os valores de cada ponto que faz parte da rota de trabalho do funcionário para o cálculo da dose. A dose é uma ponderação entre o tempo de exposição e o tempo permitido de exposição para aquele nível de ruído sem ocasionar danos à saúde ocupacional conforme Multee (2019). A fórmula para o cálculo da dose encontra-se disponível na Equação 1.

$$D = \frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_m}{T_m} \quad (1)$$

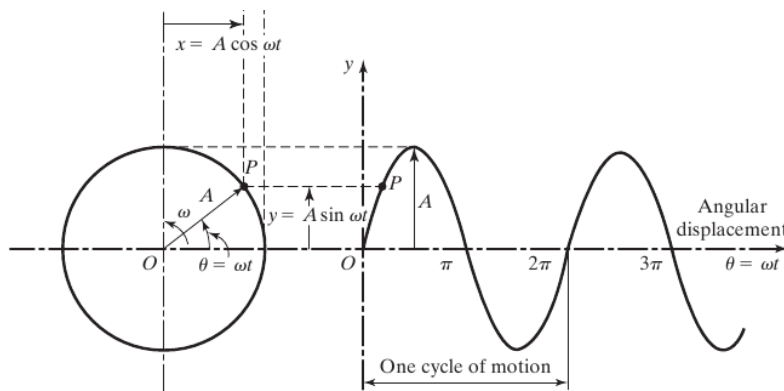
Conforme Gerges (2000), o som pode ser definido como flutuações de pressão em um meio compressível. Porém, não são todas as flutuações de pressão que são audíveis ao ouvido humano. Dessa forma, somente ocorrerá a sensação de som quando a amplitude destas flutuações e a frequência com que elas se repetem estiver dentro da faixa de 20 Hz a 20 kHz. As ondas que se encontram acima e abaixo desta faixa são denominadas, respectivamente, ondas ultrassônicas e ondas infrassônicas.

O som é parte da vida cotidiana das pessoas. No entanto, existem sons que são desagradáveis e indesejáveis. Estes sons são definidos como ruído. O efeito do ruído no indivíduo depende da amplitude, frequência, duração e também da atitude do indivíduo perante ele.

Segundo Rao (2011), a amplitude de vibração é o deslocamento máximo de um corpo vibrante de sua posição de equilíbrio.

A Figura 1 ilustra o conceito de amplitude de vibração de uma onda, no caso denotado pela letra A. A frequência é o número de ciclos por unidade de tempo. A duração é o tempo no qual ocorre as flutuações de pressão em um meio compressível e caso, estejam na faixa de 20 Hz a 20 kHz serão audíveis pelo ouvido humano.

Figura 1 – Movimento harmônico



Fonte: Rao (2011)

2. Metodologia

O potencial de danos auditivos de um dado ruído depende de seu nível e da sua duração. Por exemplo, uma exposição de um minuto a 100 dB não é tão prejudicial quanto uma exposição de 60 minutos a 90 dB. Para solucionar este tipo de problema, utiliza-se um valor único, Leq. O Leq é o nível sonoro médio integrado durante uma faixa de tempo específica conforme a Equação 1.3. Este cálculo se baseia na energia do ruído, pressão sonora quadrática. O nível de pressão sonora, NPS, é dado pela Equação 2 e $P_0 = 0,00002 \text{ N/m}^2$ o valor de referência que corresponde ao limiar da audição em 1.000 Hz. A escala dB apresenta uma correlação com a audibilidade humana muito melhor comparada a escala absoluta (N/m^2). Assim, um dB constitui a menor variação que o ouvido humano pode perceber. Um acréscimo de 6 dB no nível de pressão sonora corresponde a dobrar a pressão sonora. P é a pressão acústica.

$$\text{NPS} = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} \quad (2)$$

A pressão acústica pode ser definida como a magnitude da flutuação de pressão total em comparação com a pressão atmosférica estática $P_a = 1000$ milibar, em condições normais de temperatura e pressão ambiental. Dessa forma, obtêm-se a Equação 3.

$$P(t) = P_t(t) - P_a \quad (3)$$

Na Equação 4, a variável T representa o tempo de integração, P(t) a pressão acústica instantânea, P_0 pressão acústica de referência ($2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$) e o Leq constitui o nível contínuo (estacionário) equivalente em dB(A), que possui o mesmo potencial de lesão auditiva que o nível variado considerado.

$$Leq = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2(t)}{P_0^2} dt \quad (4)$$

Conforme Gerges (2000), as normas ISO/1.995 e 1.999 explanam o método para se calcular o Leq. No entanto, existem medidores de doses de ruído que realizam este cálculo de forma automática. Estes medidores possuem versões fixas e portáteis. Os medidores portáteis podem ser colocados na roupa do funcionário, com o microfone próximo ao ouvido. Dessa forma, os medidores portáteis possuem o objetivo de verificar a dose máxima permitida. Segundo a Portaria Brasileira 3.214 de 08 de junho de 1.978, a dose máxima permitida é de 85 dB(A) para uma jornada de trabalho de oito horas.

Outra forma de medição é o Nível de Exposição Sonora – NES. Este valor é utilizado para ruído transiente, como por exemplo o ruído gerado pela passagem de um avião. O NES é definido como o Leq normalizado para um segundo tempo de integração.

Segundo Gerges (2000), a exposição a níveis diferentes de ruído é considerada adequada conforme os limites previstos pela portaria Brasileira 3.214 de 08 de junho de 1.978, caso o valor da Dose Diária de Ruído – D não exceda a unidade. A Equação 1 apresentou a fórmula para o cálculo da Dose Diária de Ruído – D.

Na Equação 1, C_i representa o tempo real de exposição a um específico NPS, Nível de Pressão Sonora, T_i por sua vez, é o tempo total permitido para aquele NPS.

Conforme Oliveira Filho (2011), o tempo total permitido para aquele NPS, T_i é obtido pela fórmula da Equação 5.

$$T_i = \frac{16}{10^{(dB-80) \cdot \log(2)/5}} \quad (5)$$

Na Equação 5, T_i representa o tempo total permitido para aquele NPS e dB representa o valor do NPS. Utilizou-se os limites de exposição permissíveis da NR 15 do Ministério do Trabalho, com fator de troca igual a 5 conforme a Equação 5. Durante o desenvolvimento dos cálculos, considerou-se o tempo de exposição quando o funcionário está dentro do posto de trabalho realizando alguma atividade, além da exposição no trajeto entre os postos de trabalho ao longo da rota.

3. Resultados e considerações finais

O PCV (Problema do Caixeiro Viajante) pode ser definido como um veículo que deve visitar todas as cidades e retornar à origem, passando uma única vez em cada cidade e minimizando a distância percorrida (Costa, 2011).

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

A Equação 6 representa a função objetivo a ser minimizada, na qual r_{ij} são os valores de dose, na planta industrial que o funcionário ficará exposto ao se deslocar entre o equipamento i e o equipamento j, e x_{ij} é uma variável de decisão binária que recebe o valor 1 caso o funcionário se desloque entre o equipamento i e o equipamento j ou 0 caso contrário. O ato do funcionário se deslocar entre os diversos equipamentos será considerado a rota a ser percorrida.

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (7)$$

A restrição imposta pela Equação 7 garante que o funcionário vá ao equipamento j somente uma vez em cada rota percorrida.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (8)$$

A restrição presente na Equação 8 impõe que o funcionário deixe somente uma vez o equipamento i em cada rota.

$$\sum_{i=1}^n f_{ij} - \sum_{j=1}^n f_{ji} = 1 \quad \forall j \text{ com } j \neq 1 \quad (9)$$

$$f_{ij} \leq ((\text{nós}) - 1) x_{ij} \quad \forall i, j \quad (10)$$

As restrições das Equações 9 e 10 funcionam em conjunto para evitar a formação de subrotas. Uma subrota seria uma rota na qual o funcionário não inspeciona todos os equipamentos da fábrica antes de retornar ao ponto inicial. A variável de decisão f_{ij} representa o fluxo entre os equipamentos i e j, o fluxo entra em um nó j (equipamento j) deve ser uma unidade maior do que o fluxo que sai do mesmo nó j. Desta forma, o funcionário deve deixar uma unidade de fluxo em cada equipamento visitado permitindo que o modelo matemático diferencie os equipamentos inspecionados dos não inspecionados. O fluxo máximo é limitado ao número máximo de nós para evitar que o funcionário possa percorrer alguma subrota utilizando o fluxo excedente.

$$\begin{aligned} x_{ij} &\in \{0, 1\} \quad \forall i, j \\ f_{ij} &\in \mathbb{Z} \quad \forall i, j \\ f_{ij} &\geq 0 \quad \forall i, j \end{aligned} \quad (11)$$

A Equação 11 é uma restrição que garante que o x seja binário e o fluxo seja inteiro e não negativo.

Esta seção apresenta os resultados preliminares obtidos modelando o problema como um Problema do Caixeiro Viajante para os dados de Nível de Pressão Sonora, distância total percorrida e dosimetria.

O resultado do trabalho foi a partir dos níveis de pressão sonora obter a rota com menor exposição ao ruído. Essa rota foi ponto 1, ponto 3, ponto 4, ponto 10, ponto 6, ponto 7, ponto 8, ponto 5, ponto 2, ponto 9, ponto 1. Para este modelo, foi encontrada a exposição de ruído máxima de 110,14 dB(A), aproximadamente conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados experimentais para o Nível de Pressão Sonora

Quantidade de iterações	216
Rota	9 → 1 → 3 → 4 → 10 → 6 → 7 → 8 → 5 → 2

Maior exposição ruído	110,14 dB(A)
Tempo de processamento	0,04 s
Tolerância	1,00e-04
Quantidade de iterações	216

Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa forma, foi possível obter uma rota que minimizasse a exposição ao ruído para o funcionário da planta industrial. É possível observar na Tabela 1 que foram necessárias 216 iterações, num tempo de processamento de 0,04 segundos, com uma tolerância de 1,00e-04. Pode-se concluir que o algoritmo desenvolvido é eficiente.

4. Referências bibliográficas

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier. 2007.

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978**. Aprova as normas regulamentadoras – NR – do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas a Segurança e Medicina do Trabalho. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, jun. 1978.

COSTA, P. P. **Teoria de Grafos e Suas Aplicações**. Rio Claro – SP, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2011, 79 p. Dissertação de Mestrado.

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

LAPORTE, G. **The Vehicle Routing Problem: an overview of exact and approximate algorithms**. European Journal of Operational Research, v. 59, n. 3., p. 345-358. 1992.

LIMA, S. J. A.; SANTOS, R. A. R.; ARAUJO, S. A. **Otimização do Problema de Roteamento de Veículos** Capacitado Usando Algoritmos Genéticos e as Heurísticas de Gillet e Miller e Descida de Encosta. XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2015.

MULTEE, P. **Dosimetria de Ruído**. 2019. Disponível em: <<http://www.multee.com.br/servicos-de-engenharia/seguranca-do-trabalho/agentes-fisicos/dosimetria-de-ruído/>>. Acesso em 06 de Março de 2019.

OLIVEIRA FILHO, R. H. **Uma Metodologia para a Avaliação Virtual da Dose de Exposição ao Ruído no Ambiente de Trabalho**. Uberlândia – MG, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2011, 186 p. Tese de Doutorado.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. Miami: Prentice Hall. 2011. 1105 p. Fifth edition.