

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

IDENTIFICAÇÃO, ANÁLISE E TRATAMENTO DE RUÍDO GERADO EM LINHA DE
MONTAGEM DE FARÓIS AUTOMOTIVOS

por

Éverton Bressan Pedrini

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Maio de 2021

Pedrini, Éverton Bressan
IDENTIFICAÇÃO, ANÁLISE E TRATAMENTO DE RUÍDO GERADO
EM LINHA DE MONTAGEM DE FARÓIS AUTOMOTIVOS / Éverton
Bressan Pedrini. -- 2021.
23 f.
Orientador: Tiago Becker.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Isolamento Acústico. 2. Enclausuramento. 3.
Ruído. 4. Linha de Montagem. 5. Indústria Automotiva.
I. Becker, Tiago, orient. II. Título.

Éverton Bressan Pedrini

IDENTIFICAÇÃO, ANÁLISE E TRATAMENTO DE RUÍDO EM LINHA DE
MONTAGEM DE FARÓIS AUTOMOTIVOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica de Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Tiago Becker

Comissão de Avaliação:

Prof./Prof^ª. Heraldo J. Amorim

Prof./Prof^ª. Rafael A.C. Laranja

Prof./Prof^ª. Tiago Becker

Porto Alegre, Maio de 2021

AGRADECIMENTOS

A meus pais Moacir e Cleusa pelo apoio incondicional a minha educação;
Ao meu bom amigo Airton Depauli Junior pelo suporte intelectual e amizade durante o curso;
Às empresas SL do Brasil e Burmann pelo apoio na viabilização desse trabalho.

Pedrini, Éverton Bressan. **IDENTIFICAÇÃO, ANÁLISE E TRATAMENTO DE RUÍDO EM LINHA DE MONTAGEM DE FARÓIS AUTOMOTIVOS**. 2021. 22. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

Nas linhas de montagem de faróis automotivos de uma empresa do ramo automobilístico, a partir da análise das medições de ruído realizadas de forma periódica, é vista uma oportunidade de melhoria da condição dos operadores com a diminuição do nível de ruído ao qual estão expostos. Através de medições realizadas com auxílio de dosímetro e sonômetro em diferentes pontos de uma das linhas de montagem, localiza-se o processo produtivo que mais expõe os operadores ao ruído para elaboração e realização de uma análise de intervenção que, analiticamente, melhora a condição atual do equipamento, controlando o ruído por ele emitido.

PALAVRAS-CHAVE: ruído, isolamento acústico, enclausuramento, linha de montagem.

Pedrini, Éverton Bressan. **NOISE IDENTIFICATION, ANALYSIS AND TREATMENT ON AUTOMOTIVE HEADLAMP ASSEMBLY LINES**. 2021. 22. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

In the headlamp assembly lines of a automobilist company, from an analysis of the periodic noise measurements, an opportunity to improve the condition of the operators is seen as the reduction of the noise to which operators are exposed can be decreased. Through measurements performed with the aid of a dosimeter and a digital sound level meter at different locations in the assembly lines, the production process that most exposes operators is located, an intervention is proposed and it is evaluated as how much it would help to decrease the current condition of the equipment's noise emission by controlling the noise emitted by it.

KEY-WORDS: noise, acoustical insulation, enclosure, assembly line.

SUMÁRIO

1 - Introdução	8
1.1 - Motivação	8
1.2 - Revisão Bibliográfica	8
1.2.1 - Ruído e Seus Efeitos	8
1.3 - Objetivos	8
2 - Fundamentação Teórica	9
2.1 - Normas Regulamentadoras NR-15 e NHO-01	9
2.2 - Mecanismos de Atenuação do Som	9
2.3 - Tipo de Enclausuramento Acústico	10
2.3.1 - Bandas de Frequência	11
2.5 - Relação de Potência Sonora	11
2.6 - Perda de Transmissão	12
3 - Descrição do Processo de Montagem	12
4 - Materiais e Métodos	13
4.1 - Medições	13
4.1.1 - Planejamento das Medições	13
4.1.2 - Instrumentação	14
4.1.3 - Localização e Condição Ambientais das Medições	14
5 - Resultados	14
5.1 - Resultados de NPS	14
5.1.1 - Resultados para as Frequências	15
5.2- Resultados do Dosímetro	16
6 - Modificação Proposta	17
6.1 - Validação da Interferência	18
6.1.1 - Dados do Enclausuramento Parcial Existente	18
6.1.2 - Dados do Enclausuramento Total Projetado	18
6.1.3 - Dados do Material	19
6.1.4 - Estudo do Isolamento Acústico	19
7 - Conclusões	22
Referências Bibliográficas	22
Anexos	23

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Motivação

Para Merluzzi (1981), o som é definido como qualquer perturbação vibratória presente em um meio elástico com capacidade de produzir sensação auditiva, enquanto Feldman e Grimes (1985) definem o ruído como um sinal acústico aperiódico que se origina da sobreposição de várias ondas sonoras com vibrações de diferentes frequências e que não apresentam relação entre si. Segundo o Ministério da Saúde (2006), o ruído pode causar nos trabalhadores cefaleia, tontura, irritabilidade e problemas digestivos, além dos sintomas frequentes, como perda auditiva, dificuldade de fala e compreensão, zumbido e intolerância a sons intensos. Além disso, a exposição ao ruído intenso pode acarretar na mudança transitória do limiar auditivo da pessoa, o que é caracterizado pela diminuição da sensibilidade auditiva, podendo retornar ao normal após um período de afastamento de fontes de ruído. Ainda segundo o Ministério da Saúde (2006), há a possibilidade de ocorrer o trauma acústico quando o trabalhador é exposto ao ruído de forma intensa e súbita, o que pode levar a uma lesão temporária ou definitiva em diversas estruturas do ouvido.

É frisado por Franks, John & Stephenson, Mark & Stephenson, Carol, et al., (1996) que, mesmo com a existência de um programa de prevenção de perda auditiva - até mesmo um em conformidade com as normas impostas pelo governo - não é garantida a prevenção da perda auditiva ocupacional. A partir disso, vê-se a necessidade de, mesmo atendendo às normas de higiene ocupacional, mitigar os ruídos de maior intensidade.

1.2 - Revisão Bibliográfica

1.2.1 - Ruído e Seus Efeitos

Para Franks, John & Stephenson, Mark & Stephenson, Carol, et al., (1996), a perda auditiva ocupacional é um dos maiores problemas atuais no ambiente ocupacional, afetando trabalhadores nas áreas de manufatura, construção, transporte, agricultura e militar. Em relação à psicoacústica, enquanto o som é utilizado para descrever sensações prazerosas, o ruído é usado para descrever sons indesejáveis ou desagradáveis, o que traz um aspecto de subjetividade à sua definição.

Há alguns efeitos relacionados ao estresse induzido pelo ruído, como a abstenção devido a acidente, pois é sugerido que a taxa de abstenção de trabalhadores industriais aumenta quando são expostos a altos níveis de ruído equivalente durante a jornada de trabalho, não só isso, como também o número de acidentes tende a aumentar (Willy Passchier-Vermeer¹ e Wim F. Passchier, et al., 2000). Além disso, há fortes evidências que a presença de ruído pode prejudicar a performance cognitiva do ser humano. O ruído pode induzir um desamparo ao aprendizado, aumentar a excitação e diminuir a atenção na realização da tarefa (Willy Passchier-Vermeer¹ e Wim F. Passchier, et al., 2000).

1.3 - Objetivos

O ambiente industrial é regido pela produção em massa e, dependendo dos processos aplicados aos produtos, potencialmente ruidoso. Em suma, um ambiente menos ruidoso é um ambiente de maior bem-estar. Tendo isso como motivação, o objetivo principal desse trabalho é a

identificação do maior gerador de ruído em uma linha de montagem de faróis automotivos, através de medições do nível de ruído com auxílio de um sonômetro e de um dosímetro para posterior análise e tratamento do mesmo a fim de diminuir a exposição do operador mais próximo ao emissor e, conseqüentemente, diminuir o nível de pressão sonora da linha de montagem.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que se faça viável a identificação, análise e tratamento do ruído, é necessário haver, antes de mais nada, um conhecimento básico das normas devido à necessidade de especificação das medições realizadas e dos valores de referência, além dos fundamentos de isolamento acústico.

2.1 - Normas Regulamentadoras NR-15 e NHO-01

A Norma Regulamentadora 15 define, com a finalidade de avaliação em higiene ocupacional, os ruídos contínuos e de impacto como sendo ruído contínuo ou intermitente o que não é ruído de impacto e ruído de impacto os que têm duração abaixo de um segundo com um período superior a um segundo. A NR-15 estabelece limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente a partir de 85 dB(A).

A Norma de Higiene Ocupacional 01 da FUNDACENTRO é destinada à estabelecer critérios e procedimentos padronizados para uma avaliação da exposição ocupacional ao ruído que implique em riscos potenciais de surdez ocupacional. Também, para o decorrer desse trabalho, é importante salientar que a NHO-01 define Grupo Homogêneo como “um grupo de trabalhadores que experimentam exposição semelhante, de forma que o resultado fornecido pela avaliação da exposição de parte do grupo seja representativo da exposição de todos os trabalhadores que compõem o mesmo grupo”.

2.2 - Mecanismos de Atenuação do Som

Para materiais fibrosos, as fibras do material acompanham o movimento cinético do ar, o que faz com que haja a transformação de parte da energia cinética para calor. Para materiais porosos (RANDALL F BARRON, 2001), uma parcela do som é refletida dentro dos poros inúmeras vezes, fazendo com que uma parcela de sua energia seja dissipada de forma friccional entre o ar e o material sólido, uma parcela refletida e a outra parcela transmitida pelo material. Para frequências altas (CARL HOPKINS, 2007), a dissipação de energia em materiais porosos é maior em relação às baixas frequências.

O coeficiente de absorção superficial α é definido pela razão entre a energia absorvida pela superfície sobre a energia incidente sobre a superfície e é expresso pela Equação 01:

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_{in}} \quad 01$$

Onde W_{abs} é a energia acústica absorvida, em W/m^2 , e W_{in} é a energia acústica incidente sobre a superfície, em W/m^2 . Geralmente o valor do coeficiente de absorção superficial varia em função da frequência do som incidente.

Como um ambiente, normalmente, é constituído por n superfícies e elas podem apresentar diferentes coeficientes de absorção superficial para a mesma frequência, há a necessidade de calcular-se um coeficiente de absorção superficial médio $\bar{\alpha}$, conforme expressa a Equação 02:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_j S_j}{S_o} \quad 02$$

Onde α_j é o coeficiente de absorção superficial de cada componente, S_j é a área do componente, em m^2 , e S_o é a área superficial total, em m^2 .

O coeficiente de transmissão sonora a_t é definido como a razão da energia acústica transmitida pela energia acústica incidente, conforme a Equação 03:

$$a_t = \frac{W_{tr}}{W_{in}} \quad 03$$

Onde W_{tr} é a energia acústica transmitida, em W/m^2 .

O coeficiente geral de transmissão a_T para elementos em paralelo é dado pela Equação 04:

$$a_T = \frac{\sum a_{tj} S_j}{S} \quad 04$$

Onde a_{tj} é o coeficiente de transmissão sonora de cada componente, S_j é a área do componente, em m^2 , e S é a área total dos componentes em paralelo, em m^2 .

2.3 - Tipo de Enclausuramento Acústico

Enclausuramento acústico é um termo técnico utilizado para definir uma estrutura de engenharia fechada especialmente desenhada com o intuito de redução, minimização ou atenuação de ruído. A capacidade de isolamento do enclausuramento passa pela relação entre tamanho do ambiente em questão e comprimento de onda, uma vez que uma onda grande em relação ao volume do enclausuramento compromete o seu desempenho.

Os enclausuramentos são considerados pequenos quando o comprimento de onda analisado é maior quando comparado à maior dimensão interior do enclausuramento (RANDALL F. BARRON, 2001). Para propósitos práticos, um enclausuramento é considerado pequeno quando satisfaz a condição expressa pela Equação 05:

$$\frac{f L_{max}}{c} \leq 0,1 \quad 05$$

Onde f é a frequência, em Hz, L_{max} é maior dimensão interior do enclausuramento, em m e c é a velocidade do som no ar, em m/s^2 . Quando atingido esse requisito, tem-se um comprimento de onda muito grande para o espaço disponível no enclausuramento, o que o dificulta o enclausuramento da onda.

Para um enclausuramento pequeno, as paredes e o ar interno podem ser considerados acoplados e, nesse caso, a absorção superficial e a perda de transmissão pelas paredes têm pouco impacto na performance do enclausuramento, tornando a rigidez das paredes do enclausuramento o fator mais importante para seu bom funcionamento.

Os enclausuramentos são considerados grandes quando o comprimento de onda analisado é menor do que a maior dimensão interior do enclausuramento (RANDALL F. BARRON, 2001),

o que facilita seu enclausuramento. Normalmente um enclausuramento grande satisfaz a Equação 06:

$$\frac{fV_o^{1/3}}{c} \geq 1 \quad 06$$

Onde V_o é o volume de ar dentro do enclausuramento, em m^3 .

Para enclausuramentos com aberturas, o valor do coeficiente de absorção superficial para uma abertura simples é $\alpha = 1$. Já o coeficiente de transmissão sonora leva em conta um fator direcional em relação ao operador. Para operador localizado em frente à abertura, $a_t = 1$, ao lado ou em cima sem superfícies refletivas, $a_t = 1/3$ e ao lado ou em cima com superfícies refletivas, $a_t = 2/3$.

2.3.1 - Bandas de Frequência

O ouvido humano é sensível a faixas de frequência sonora de 16 Hz a 16 kHz (RANDALL F. BARRON, 2001) e se comporta forma diferente em diferentes frequências. O mesmo vale para os materiais. Por esse motivo, usualmente é feita a divisão do espectro de frequências na forma de bandas de oitava, sendo uma banda de oitava o dobro de sua banda inferior, ou a metade de sua banda superior. Enquanto isso, um terço de banda de oitava é definido como banda de frequência cuja banda superior é a banda inferior multiplicada pela raiz cúbica de dois. A conversão de um terço de banda de oitava para banda de oitava é dada pela Equação 07:

$$L_\Sigma = 10\log(10^{(L_1/10)} + 10^{(L_2/10)} + 10^{(L_3/10)}) \quad 07$$

Onde L_Σ , em dB, é a banda de oitava resultante, L_1 , L_2 e L_3 são um terço de banda de oitava.

Para combinar os valores dos níveis de pressão sonora das bandas de oitava utiliza-se a Equação 08.

$$L_a = 10\log_{10}\left[\sum 10^{\frac{L_W + CFA}{10}}\right] \quad 08$$

Onde L_a é a resultante da combinação dos níveis de pressão sonora e L_W é o nível de pressão sonora da frequência. Os valores de CFA são fatores de ponderação para a escala A

2.4 - Relação de Potência Sonora

A potência sonora emitida pela fonte de ruído W é igual à soma potência sonora absorvida ou dissipada nas superfícies das paredes com a energia transmitida pelas paredes e pode ser calculada pela Equação 09:

$$W = W_{tr} + W_{abs} = \left(\frac{\sum S_j \alpha_{tj}}{S_o}\right) W_{inc} + \left(\frac{\sum S_j \alpha_{tj}}{S_o}\right) W_{inc} \quad 09$$

Onde W_{inc} é a potência sonora emitida pela fonte de ruído incidente nas paredes do enclausuramento, em W/m^2 , e S_o é a área superficial total do enclausuramento, em m^2 .

A potência sonora emitida pelas superfícies do enclausuramento para o seu redor pode ser descrita pela Equação 10:

$$W_{out} = \left(\frac{\sum S_j a_{tj}}{S_o} \right) W_{inc} \quad 10$$

Logo, pode-se denotar a relação de potência sonora para o enclausuramento a partir da Equação 09 e Equação 10 pela Equação 11:

$$\frac{W}{W_{out}} = 1 + \frac{\sum S_j \alpha_j}{\sum S_j a_{tj}} \quad 11$$

W_{out} a potência sonora radiada pela superfície do invólucro, em W/m^2 .

2.5 - Perda de Transmissão

O enclausuramento reduz a pressão sonora radiado pelo sistema. A perda de transmissão IL é a quantificação dessa diminuição da pressão e é definida pela Equação 12:

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_{out}} \right) = L_W - L_{W,out} \quad 12$$

Onde $L_{W,out}$ é a pressão sonora emitida pelo enclausuramento, em dB.

3 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE MONTAGEM

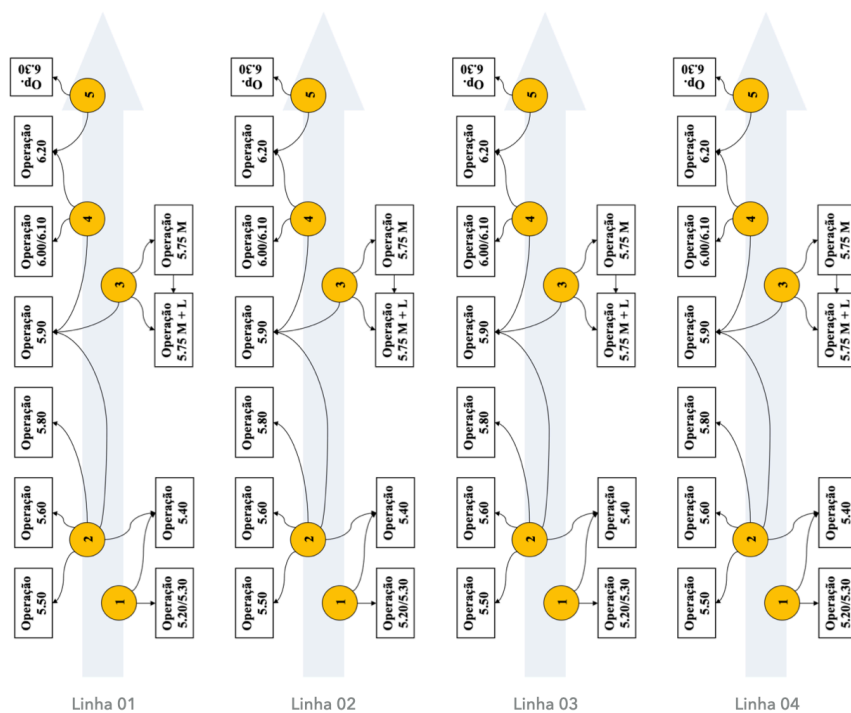
A fábrica conta com quatro linhas de montagem enclausuradas para controle de temperatura, umidade e impurezas. Na Figura 01 abaixo é possível ver uma das linhas desde sua última estação.

Figura 01: Linha de montagem vista desde sua última estação.



A linha 03 está desativada e não há previsão de reativação devido às demais suprirem de forma satisfatória a demanda da montadora. As operações automatizadas ocupam um lado da linha, enquanto as operações manuais ocupam, prioritariamente o outro lado da linha. Na Figura 02 abaixo é possível observar a disposição das linhas com o fluxo de processo da linha de montagem pertinente a todos os produtos produzidos, onde os círculos amarelos representam os operadores e as setas a eles ligadas as estações que atendem. As setas maiores em azul claro mostram o fluxo de processo e os pontos marcados como A, B e C serão posteriormente mencionados.

Figura 02: Disposição das linhas de montagem dentro de seu ambiente.



4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - Medições

4.1.1 - Planejamento das Medições

Com base em medições de ruído periódicas realizadas por toda a unidade fabril, evidenciou-se que as linhas de montagem são o ambiente mais ruidoso da fábrica (Anexo 1). Além de ser o ambiente onde há a maior concentração de operadores por metro quadrado, o fato de ser enclausurada diminui a dispersão do ruído, mantendo-o dentro do ambiente de trabalho.

Como o processo de fabricação entre as linhas não é sincronizado, é necessário, inicialmente, apurar, com um sonômetro, o tempo de aferição propício - com todas as linhas ativas em funcionamento - para que seja, então, utilizado esse mesmo tempo em todas as aferições precedentes. Posteriormente, escolhendo-se uma linha, com um sonômetro é necessário dividi-la

em grupos e constatar qual deles é o mais ruidoso. No mais ruidoso, buscar, com o auxílio de um dosímetro, qual dos operadores desse grupo é o mais exposto ao ruído. Visto que há a possibilidade de interferência do ruído produzido em uma linha sobre a outra, com o operador que ocupa a função que mais está exposta ao ruído em toda a linha de montagem, é necessário verificar qual, dentre os três operadores que ocupam essa função nas três linhas ativas, é o mais exposto ao ruído entre as três linhas.

4.1.2 - Instrumentação

As medições de NPS foram obtidas pelo técnico em segurança do trabalho da empresa Burmann com o auxílio de um sonômetro da marca *01dB* do modelo 01dB FUSION SLM, classe 1. Programado para obter os níveis de pressão sonora ponderado em escala A (RANDALL F. BARRON, 2001). Seus parâmetros gerais foram ajustados conforme a NR-15.

As medições da exposição ocupacional dos operadores foram obtidas com apoio do técnico em segurança do trabalho da empresa Burmann com o auxílio de um dosímetro da marca *01dB*, modelo WED 007, classe 2. Seus parâmetros gerais, assim como para com o sonômetro, foram ajustados conforme a NR-15.

4.1.3 - Localização e Condições Ambientais das Medições

As medições desse estudo foram realizadas no primeiro turno nos dias 9 e 25 de fevereiro de 2021 nas linhas de montagem de uma empresa do ramo de iluminação automotiva, localizada no Complexo Industrial da Automotivo da General Motors (CIAG). Em ambos os dias, a temperatura no ambiente das linhas de montagem era de 21°C, com umidade relativa de 50%.

5 - RESULTADOS

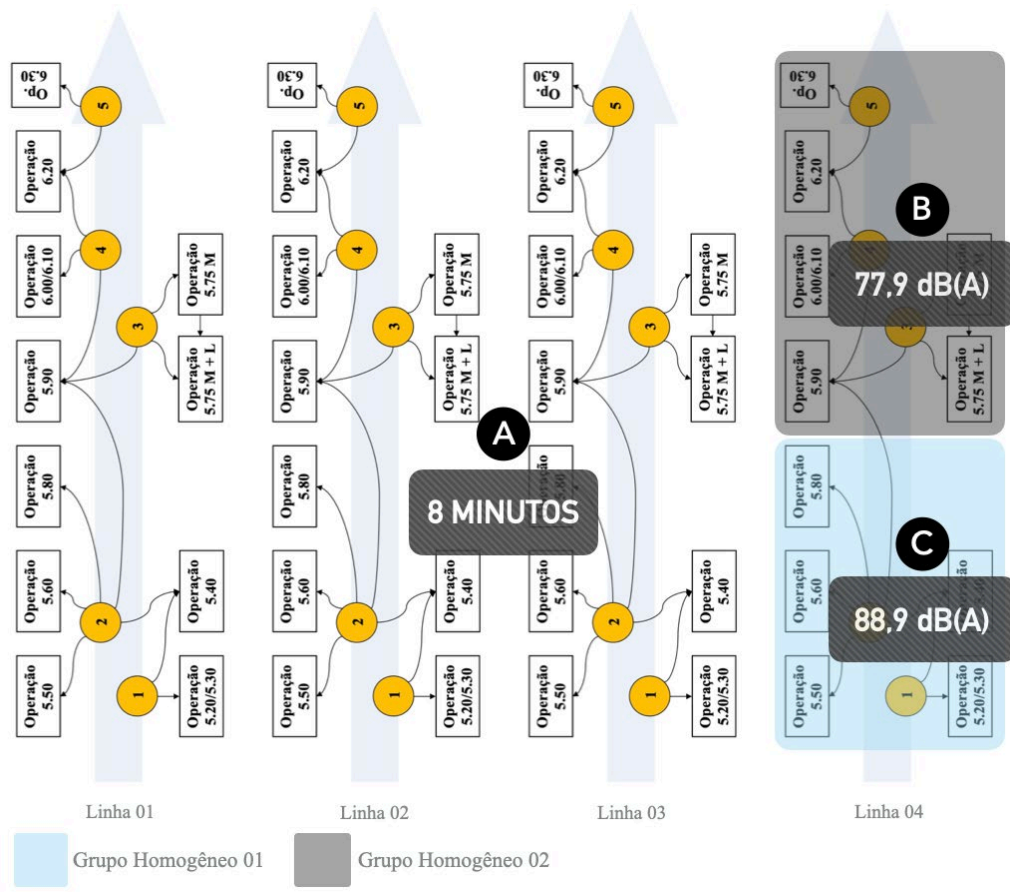
5.1 - Resultados de NPS

Com as três linhas ativas em funcionamento, foi imprescindível, inicialmente, verificar o tempo necessário de medição para a avaliação do ruído. A Figura 03 mostra um mapa geral das linhas de montagem, sendo A, B e C os pontos onde foram feitas as medições. Com cada processo sendo repetido a cada aproximadamente 47 segundos de forma assíncrona entre as linhas, houve a necessidade de acompanhar o nível de ruído equivalente (L_{eq}) para verificar o tempo necessário de medição. Inicialmente, no ponto mais centralizado entre as linhas, ponto A, foi realizada a medição para verificação do tempo necessário de avaliação do ruído. Disponível no visor do sonômetro utilizado, o L_{eq} mostrou-se convergido para um valor estável a partir do minuto sete. Como medida de padronização, todas as medições subsequentes desse estudo, durante o funcionamento das linhas, foram realizadas por um período de oito minutos.

Para as medições específicas dentro da linha de montagem, foi escolhida a linha 4 de forma aleatória. Os operadores foram divididos em 2 grupos homogêneos. O grupo homogêneo 01 contendo os operadores responsáveis pela montagem inicial do farol, sendo esses operador 1 e operador 2, e o grupo homogêneo 02 contendo os operadores responsáveis pela montagem intermediária e final do farol, sendo esses operador 3, operador 4 e operador 5. Partindo dessa divisão, o ponto B foi escolhido para o posicionamento do sonômetro devido à não interferência no processo produtivo e máxima proximidade possível a todas as operações do grupo homogêneo

02. Passado o tempo programado para a medição, a gravação foi salva na memória do aparelho e, com o mesmo critério do grupo homogêneo 02 anterior, para o grupo homogêneo 01 o ponto C foi escolhido para o posicionamento do sonômetro. Com as duas medições em mãos, o programa dBTrait foi aberto e o resultado analisado. O grupo homogêneo 01 apresentou um nível de ruído equivalente durante o período de 88,9 dB(A), contra o grupo homogêneo 02, que apresentou um nível de ruído equivalente de 77,9 dB(A). Esses resultados apontam para uma maior geração de ruído no grupo homogêneo 01, onde se localizam as operações automatizadas 5.50, 5.60 e 5.80 e as operações manuais 5.20, 5.30 e 5.40. Somente esses resultados já justificam uma intervenção a fim de diminuir o ruído ao qual os operadores do grupo homogêneo 1 estão expostos.

Figura 03: Disposição dos pontos de medição e resultados.

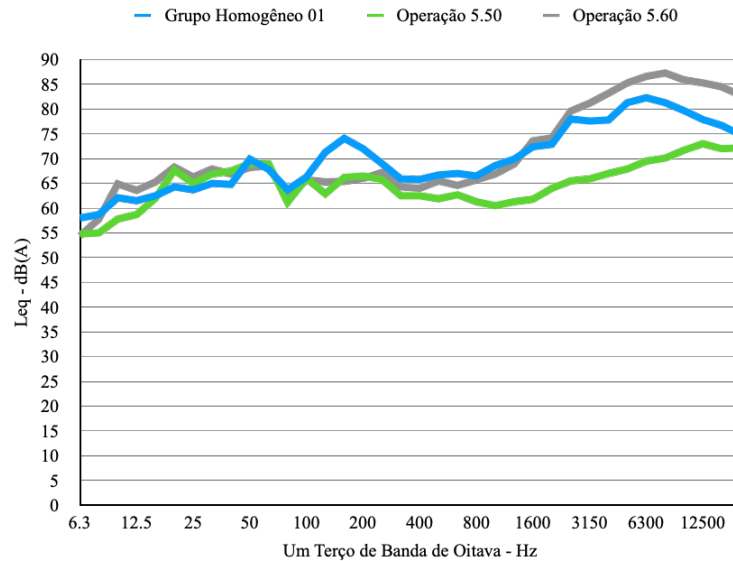


5.1.1 - Resultados Para as Frequências

Com base no que indicam os resultados obtidos e na Tabela 02 é feita a medição das faixas de frequências nas duas operações automatizadas que geram ruído durante operação (operação 5.50 e 5.60) e estão compreendidas no grupo homogêneo 01 com a finalidade de identificar qual delas mais contribui para o alto ruído constatado. Com o auxílio do mesmo sonômetro posicionado em frente à estação, o ruído do ciclo dessas operações foi gravado em um período no qual não havia nenhum outro equipamento ligado nem pessoas trabalhando nas linhas de montagem. A análise das faixas de frequências também é feita na medição realizada no grupo homogêneo 01, no

ponto C. Abaixo, na Figura 04, está disposto o gráfico de nível equivalente por um terço de banda de oitava do grupo homogêneo 01, operação 5.50 e operação 5.60.

Figura 04: Gráfico do nível equivalente por um terço de banda de oitava.



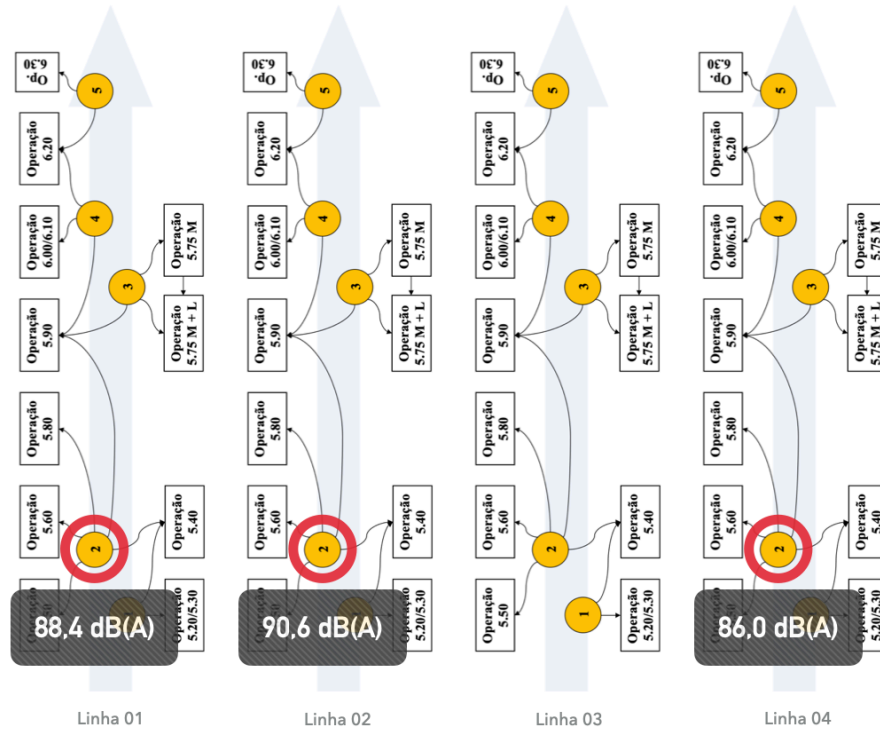
Analisando, inicialmente, os resultados de nível de pressão sonora para o grupo homogêneo 01 e operação 5.60, as frequências acima de 2.000 Hz são as maiores responsáveis pelos níveis de ruído maiores que 75 dB(A). O nível de ruído da operação 5.50 também tende a um valor maior em função do aumento da frequência, porém em nenhum momento ultrapassa 75 dB(A), chegando ao pico de 73 dB(A) na frequência de 12.500 Hz. Esses resultados dão indícios de que a operação 5.60 seja, dentro de todos os processos produtivos executados dentro do meio do grupo homogêneo 01, a maior causadora dos altos níveis de ruído constatados.

5.2 - Resultados Dosímetro

Ainda na linha 4, como foi constatado no grupo homogêneo 01, sofre uma exposição ao ruído superior ao do grupo homogêneo 02. Nos dois operadores presentes nesse grupo, com o intuito de identificar qual deles é o mais exposto, foi colocado um dosímetro próximo ao ouvido pelo mesmo período de tempo já padronizado e o ruído foi gravado. Subsequentemente, com as medições em mãos, da mesma forma como foi feito com as medições com o sonômetro, o programa dBTrait foi aberto e o resultado analisado. Foi constatado que o operador 2 da linha 4 foi exposto a um nível de ruído equivalente de 86,0 dB(A), enquanto o operador 1 foi exposto a um nível de ruído equivalente de 85,5 dB(A). Embora com valores muito próximos, pode-se afirmar que o operador 2, dentre todos os operadores da linha 4, é o mais exposto ao ruído. Para localizar, dentre as três linhas em funcionamento, a que o operador 2 sofre maior incidência do ruído proveniente de sua linha e das outras - devido às linhas serem confinadas -, todos os operadores que ocupam esse posto nas demais linhas passaram pelo processo de medição de ruído com o dosímetro, da mesma forma que foi realizado com o operador 2 da linha 4. O resultado para o operador 2 da linha 1 foi um nível de ruído equivalente de 88,4 dB(A) e, para o operador 2 da linha 2, um nível de ruído equivalente de 90,6 dB(A). A Figura 05 mostra um mapa geral das linhas

de montagem com os operadores que ocupam o posto 2 destacados e seus respectivos valores de nível de ruído equivalente.

Figura 05: Disposição dos pontos de medição e resultados.



Além de evidenciar a alta exposição ao ruído sofrida pelo operador 2 nas diferentes linhas de montagem, os resultados mostram que a linha 2, situada em uma posição mais centralizada em relação às outras no ambiente enclausurado das linhas, é, talvez por esse motivo, a linha na qual os operadores estão mais expostos ao ruído.

6 - MODIFICAÇÃO PROPOSTA

Como foi constatado, o maior causador do ruído na linha de montagem é a operação 5.60 (aplicação de plasma). Essa estação já conta com um enclausuramento parcial e com uma porta (composta do mesmo material do enclausuramento) acionada por um pistão pneumático, que é fechada para que o farol receba jatos de ar ionizado para a eliminação de impureza e diminuição da eletricidade estática dentro da peça. Porém, devido a sua proximidade ao produto, é impossível mantê-la fechada durante a aplicação de plasma pelo robô. Para viabilizar o fechamento dessa porta durante a aplicação do plasma, decide-se projetar uma adaptação em sua estrutura que possibilite o enclausuramento e vedação da operação afastando-a do produto, o que possibilita a utilização da mesma porta e estrutura para o enclausuramento total da estação. Então proposto o enclausuramento da operação, é esperado que, ao mitigar o ruído emitido por ela, todas as linhas deverão experimentar uma diminuição na exposição ao ruído.

A aplicação de plasma é usada como agente de adesão no canal de fechamento carcaçalente. Utilizada para a obtenção de um contato mais íntimo entre a superfície do canal e a cola aplicada na estação subsequente, é um processo vital para a boa qualidade do produto final. A

Figura 06 e a Figura 07 mostram o plasma sendo aplicado no produto e a estação como um todo, respectivamente.



Figura 06: Aplicação do plasma no canal da carcaça.

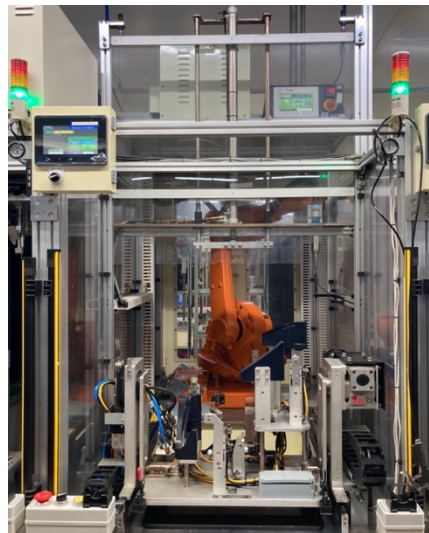


Figura 07: Estação de aplicação de plasma parcialmente enclausurada.

6.1 - Validação da Interferência

Para que possa ser implementada, faz-se necessária a validação da modificação quanto a sua eficácia. Para tanto, um estudo do isolamento acústico proporcionado pela alteração torna-se essencial. Com fins de simplificação, o enclausuramento proposto será considerado totalmente selado e totalmente constituído de placas de acrílico $\frac{1}{4}$ de polegada. A temperatura do ar considerada é a temperatura nos dias das medições, 21°C . Segundo "Controle de Ruído Industrial e Acústica - Randall F Barron", a essa temperatura, a velocidade do som no ar c é de $343,3\text{ m/s}$.

6.1.1 - Dados do Enclausuramento Parcial Existente

As dimensões medidas do existente enclausuramento parcial são $1,4$ metro de comprimento, 1 metro de largura e $1,3$ metro de altura. A abertura está direcionada para o operador, conforme pode ser visto na Figura 07, e tem 1 metro de largura e 1 metro de altura. O volume do enclausuramento - não considerando o robô nem o berço com o farol - é de $1,82\text{ m}^3$, a superfície S sem considerar o chão é de $6,64\text{ m}^2$ e a superfície S_o considerando o chão é de $8,04\text{ m}^2$. Para fins práticos, o operador é considerado em frente à abertura.

6.1.2 - Dados do Enclausuramento Total Projetado

As dimensões do enclausuramento total foram projetados sendo $1,8$ metro de comprimento - devido ao afastamento da porta ao produto -, 1 metro de largura e $1,3$ metro de altura. O volume do enclausuramento - não considerando o robô nem o berço com o farol - é de $2,23\text{ m}^3$, a superfície S sem considerar o chão é de $9,08\text{ m}^2$ e a superfície S_o considerando o chão é de $10,88\text{ m}^2$.

6.1.3 - Dados do Material

O isolamento existente na estação e na porta é composto por placas de acrílico (Plexiglass) ¼ de polegada, que tem suas propriedades de coeficiente de absorção superficial e coeficiente de transmissão sonora dispostos na Tabela 03 abaixo. Para fins de padronização, o enclausuramento total é projetado com o mesmo material.

Tabela 03: Tamanho do enclausuramento em relação à frequência do som segundo (RANDALL F. BARRON, 2001).

Dados do Material do Enclausuramento		
<i>Placa de Acrílico (Plexiglas) ¼ de polegada de espessura</i>		
Frequência (Hz)	α	α_t
125	0,20	0,025000
250	0,07	0,020000
500	0,05	0,006300
1.000	0,04	0,001600
2.000	0,04	0,000500
4.000	0,03	0,000063
8.000	-	-
16.000	-	-

6.1.4 - Estudo do Isolamento Acústico

A metodologia de cálculo para um enclausuramento inicia com a avaliação de seu tipo, visto que enclausuramentos grandes têm um método de cálculo diferente ao dos enclausuramentos pequenos. Realizado por bandas de oitava, para os enclausuramentos grandes é necessário calcular os coeficientes de absorção e de transmissão e, a partir desses valores, descobrir a relação de potência sonora. A perda de transmissão é calculada a partir da relação de potência sonora e seu valor é a quantização da redução proporcionada pelo enclausuramento no o nível de pressão sonora para determinada banda de oitava.

A partir dos valores de nível equivalente por um terço de banda de oitava da operação 5.60 dispostos na Figura 04 não é possível calcular diretamente o enclausuramento total, pois é necessário corrigir os valores medidos, uma vez que é existente um enclausuramento parcial e, portanto, os valores encontrados não representam o valor emitido pela máquina aplicadora de plasma.

O tipo de enclausuramento em função da banda de oitava para o enclausuramento parcial já existente e o enclausuramento total projetado é calculado a partir da Equação 05 e Equação 06 e disposto na Tabela 04 a seguir.

Tabela 04: Tamanho dos enclausuramentos em relação à frequência do som.

Frequência (Hz)	Enclausuramento Parcial		Enclausuramento Total	
	Índice	Tamanho	Índice	Tamanho
125	0,4	-	0,5	-
250	0,9	-	0,9	-
500	1,8	Grande	1,9	Grande
1.000	3,6	Grande	3,9	Grande
2.000	7,1	Grande	7,7	Grande
4.000	14,2	Grande	15,5	Grande
8.000	28,5	Grande	30,9	Grande
16.000	56,9	Grande	61,9	Grande

Para frequências acima de 500 Hz, o enclausuramento é classificado como grande, logo, para frequências inferiores a essa, usar as relações de enclausuramento é questionável, portanto frequências abaixo de 500 Hz não serão consideradas nos cálculos. Isso se dá devido ao comprimento de onda. Ademais, os cálculos também não serão realizados para frequências acima de 4.000 Hz devido às limitações nos dados de coeficiente de absorção superficial e coeficiente de transmissão sonora presentes na literatura. Porém, qualquer valor combinado de nível de pressão sonora (L_a) disposto na Tabela 05 refere-se a combinação dos valores de L_W de todas as bandas de oitava. Para as bandas que não podem ser calculadas devido às relações de enclausuramento ou a inexistência, na bibliografia utilizada, dos valores de a_t e α , é utilizado o valor de $L_{W,out}$ Enclausuramento Parcial.

Como já mencionado, a medição de ruído equivalente da estação 5.60 não representa o valor emitido pela máquina aplicadora de plasma, mas sim o do enclausuramento parcial existente. Logo, é necessário calcular, a partir dessa medição, o nível de pressão sonora emitido pela máquina. O nível de ruído referente às bandas de oitava é retirado da Figura 04, porém há a necessidade de conversão dos dados de um terço de banda de oitava para banda de oitava. Para isso utiliza-se a Eq. 07 e para a combinação desses valores utiliza-se a Eq. 08. Estão disposto na Tabela 05 os valores de $L_{W,out}$ Enclausuramento Parcial e $L_{a,out}$ Enclausuramento Parcial encontrados.

A metodologia de cálculo será apresentada detalhadamente para a frequência de 1000 Hz e os resultados para essa e as outras frequências é dado na Tabela 05. Os coeficientes de absorção α e de transmissão sonora a_t para o material são encontrados na Tabela 02. Para obter o $S \cdot \alpha$ do enclausuramento parcial é necessário multiplicar o coeficiente α pela superfície coberta pelas placas de acrílico e somar ao coeficiente de absorção superficial α para aberturas multiplicado pelo tamanho da abertura:

$$S \cdot \alpha = \alpha_{plexiglas} \cdot S + \alpha_{AberturaSimples} \cdot S_{Abertura}$$

$$S \cdot \alpha = 1,226 \text{ m}^2$$

Para o $S \cdot a_t$ do enclausuramento parcial, segue-se o mesmo procedimento, dessa vez somando ao coeficiente de transmissão a_t Abertura para o operador em frente à abertura multiplicado pela área da abertura.

$$S \cdot a_t = a_{t \text{ plexiglas}} \cdot S + a_{t \text{ Abertura}} \cdot S_{Abertura}$$

$$S. a_t = 1,011 m^2$$

Com os valores encontrados a relação de potência sonora pode ser calculada pela Eq. 11:

$$\frac{W}{W_{out}} = 1 + \frac{\Sigma S_j \alpha_j}{\Sigma S_j a_{tj}}$$

$$\frac{W}{W_{out}} = 2,252$$

Empregando a Eq. 12 ao valor encontrado é calculada a perda de transmissão IL:

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_{out}} \right)$$

$$IL = 3,5 \text{ dB(A)}$$

Ainda, manipulando a Eq. 12 é possível calcular, por fim, o nível de pressão sonora emitido pelo equipamento $L_{W,Equipamento}$:

$$L_{W,Equipamento} = IL + L_{W,out \text{ Enclausuramento Parcial}}$$

$$L_{W,Equipamento} = 75,7 \text{ dB(A)}$$

Os valores combinados de nível de pressão sonora $L_{a,Equipamento}$ são então calculados pela Equação 08. Para os cálculos de valores de nível de pressão sonora emitido pelo enclausuramento total a mesma metodologia previamente aplicada é usada, todavia, dessa vez, partindo do valor de $L_{W,Equipamento}$ e obtendo $L_{W,out \text{ Enclausuramento Total}}$.

Tabela 05: Solução para o enclausuramento proposto.

	Frequência (Hz)							
Enclausuramento Parcial	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000
$L_{a,out} \text{ (dB(A))}$	70,2	70,8	69,5	72,1	81,5	88,3	91,4	89,1
$L_{W,out} \text{ (dB(A))}$	93,6							
$S. a_t \text{ (m}^2\text{)}$	-	-	1,042	1,011	1,003	1,000	-	-
$S. \alpha \text{ (m}^2\text{)}$	-	-	1,332	1,266	1,266	1,199	-	-
W/W_{out}	-	-	2,279	2,252	2,261	2,199	-	-
$IL \text{ (dB(A))}$	-	-	3,6	3,5	3,5	3,4	-	-
Equipamento								
$L_{W,Equipamento} \text{ (dB(A))}$	70,2	70,8	73,1	75,7	85,0	91,7	91,4	89,1
$L_{a,Equipamento} \text{ (dB(A))}$	95,6							
Enclausuramento Total								
$S. a_t \text{ (m}^2\text{)}$	-	-	0,057	0,015	0,005	0,001	-	-
$S. \alpha \text{ (m}^2\text{)}$	-	-	0,454	0,363	0,363	0,272	-	-
W/W_{out}	-	-	8,937	26,000	81,000	477,190	-	-
$IL \text{ (dB(A))}$	-	-	9,512	14,150	19,085	26,787	-	-
$L_{W,out} \text{ (dB(A))}$	70,2	70,8	63,6	61,5	65,9	65,0	91,4	89,1
$L_{a,out} \text{ (dB(A))}$	91,0							

7 - CONCLUSÕES

Dentro do principal objetivo desse trabalho, a identificação da estação 5.60 como a maior gerador de ruído da linha de montagem foi executada com êxito e possibilitou o estudo de seu enclausuramento total, além da comparação com o enclausuramento parcial hoje instalado. Com o enclausuramento total é obtida uma estimativa de redução do nível de pressão sonora emitido pelo $L_{a,out \text{ Enclausuramento Total}}$ em relação ao $L_{a,out \text{ Enclausuramento Parcial}}$, passando de 93,6 dB(A) para 91 dB(A). Se for observada a estimativa de redução do nível de pressão sonora do enclausuramento total $L_{a,out \text{ Enclausuramento Total}}$ em relação ao $L_{a,Equipamento}$, a diferença cresce, passando de 95,6 dB(A) para 91 dB(A). Isso é explicado pelo fato de não ter sido possível avaliar os valores de $L_{W,out \text{ Equipamento}}$ e $L_{W,out \text{ Enclausuramento Total}}$ para todas as bandas de oitava devido ao comprimento de onda para as baixas frequências e à falta, na bibliografia utilizada, dos valores dos coeficientes de absorção e transmissão sonora para as altas frequências e assim no nível de pressão sonora global ter propagando o uso, então, dos valores de $L_{W,out \text{ Enclausuramento Parcial}}$ para as bandas sem a possibilidade de cálculo. Espera-se, portanto, um melhor desempenho da atenuação do que a encontrada, dado que é observada uma boa tendência de atenuação do ruído nos cálculos para as frequências altas e a maior potência sonora observada na fonte provém delas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NR-15 - Norma Regulamentadora No.15. Atividades e operações insalubres. 2014.
- CARL HOPKINS. Isolamento Sonoro, 2007.
- FRANKS, JOHN & STEPHENSON, MARK & STEPHENSON, CAROL. Previnindo a perda de audição ocupacional: Um guia prático, 1996.
- FUNDACENTRO. Avaliação da exposição ocupacional ao ruído: NHO-01, 2001.
- MERLUZZI, F. Patologia do Ruído. In: SARTORELLI, E. Tratamento de Medicina Ocupacional, 1981.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE, SECRETARIA DE ATENÇÃO À SAÚDE, DEPARTAMENTO DE AÇÕES PROGRAMÁTICAS ESTRATÉGICAS. Perda auditiva induzida por ruído (Pair) – Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2006.
- PASSCHIER-VERMEER, WILLY & PASSCHIER, WIM. Exposição ao Ruído e Saúde Pública. Perspectivas de saúde ambiental, 2001.
- RANDALL F BARRON. Controle de Ruído Industrial e Acústica, 2001.

ANEXOS

Anexo 1

Nome	WED 13302
Empresa	WED 13302
Função	Líder de Produção
Setor	Montagem

Arquivo	13302_190219_084541.CMG
Períodos	1m
Início	19/02/2019 07:45
Fim	19/02/2019 16:28
Localização	WED 13302
Ponderação	A
Tipo de dados	Leq
Unidade	dB
Período de início	Leq
19/02/2019 07:45	82,9
19/02/2019 07:46	78,7
19/02/2019 07:47	80,6
19/02/2019 07:48	78,5
19/02/2019 07:49	80,5
19/02/2019 07:50	75,1
19/02/2019 07:51	77,1
19/02/2019 07:52	80,3
19/02/2019 07:53	81,5
19/02/2019 07:54	75
19/02/2019 07:55	75,5
19/02/2019 07:56	81,9
19/02/2019 07:57	84,1
19/02/2019 07:58	78,4
19/02/2019 07:59	77,4
19/02/2019 08:00	76,3
19/02/2019 08:01	75,2
19/02/2019 08:02	72
19/02/2019 08:03	75,5
19/02/2019 08:04	75,2
19/02/2019 08:05	76,1
19/02/2019 08:06	75,9
19/02/2019 08:07	76,6
19/02/2019 08:08	85
19/02/2019 08:09	82,9
19/02/2019 08:10	79,4
19/02/2019 08:11	80,7
19/02/2019 08:12	75,4
19/02/2019 08:13	78,8
19/02/2019 08:14	89,5
19/02/2019 08:15	96
19/02/2019 08:16	100,9
19/02/2019 08:17	91,1
19/02/2019 08:18	83,4
19/02/2019 08:19	90,5
19/02/2019 08:20	96,5
19/02/2019 08:21	85,9
19/02/2019 08:22	71,4
19/02/2019 08:23	85,9
19/02/2019 08:24	78,3
19/02/2019 08:25	85,1
19/02/2019 08:26	91,9
19/02/2019 08:27	91,6
19/02/2019 08:28	98,3
19/02/2019 08:29	101,4
19/02/2019 08:30	95,6
19/02/2019 08:31	110
19/02/2019 08:32	81
19/02/2019 08:33	88,1
19/02/2019 08:34	95,2
19/02/2019 08:35	104,7
19/02/2019 08:36	85,4
19/02/2019 08:37	90,8
19/02/2019 08:38	94,9
19/02/2019 08:39	80,6
19/02/2019 08:40	81,7
19/02/2019 08:41	102,7
19/02/2019 08:42	83,9
19/02/2019 08:43	107,9
19/02/2019 08:44	99,2
19/02/2019 08:45	94,8
19/02/2019 08:46	76,9
19/02/2019 08:47	87,4
19/02/2019 08:48	86,7
19/02/2019 08:49	91,2
19/02/2019 08:50	85,8
19/02/2019 08:51	89,5
19/02/2019 08:52	83,3
19/02/2019 08:53	90,1
19/02/2019 08:54	85,4
19/02/2019 08:55	85,7
19/02/2019 08:56	84,8
19/02/2019 08:57	76,6
19/02/2019 08:58	84,7
19/02/2019 08:59	76,4
19/02/2019 09:00	82,6

Arquivo	WED 13302			
Comentários				
Início	07:45:41 terça feira, 19 de fevereiro de 2019			
Fim	16:28:18 terça feira, 19 de fevereiro de 2019			
Duração elementar	1s			
Períodos totais	31357			
Canal	Tipo	Peso	Min.	Max.
WED 13302	Leq	A	50	130
WED 13302	Leq	C	50	130
WED 13302	Pico	Lin	70	150

NR-15				
Arquivo	WED 13302			
Localização	WED 13302			
Tipo de dados	Leq			
Ponderação	A			
Início	07:45:41 terça feira, 19 de fevereiro de 2019			
Fim	16:28:18 terça feira, 19 de fevereiro de 2019			
Taxa de troca Q	5			
	Lavg	Dose	Desvio Padrão	Z
	dBA	%		
Localização	82,1	66,9	7,67	1,960
Intervalo	81,40	37,00	Confiança	95,0%

Fundacentro				
Arquivo	WED 13302			
Localização	WED 13302			
Tipo de dados	Leq			
Ponderação	A			
Início	07:45:41 terça feira, 19 de fevereiro de 2019			
Fim	16:28:18 terça feira, 19 de fevereiro de 2019			
Taxa de troca Q	3			
	Leq	Dose	Desvio Padrão	Z
	dBA	%		
Localização	91,2	418,9	11,64	1,960
Intervalo	90,14	92,26	Confiança	95,0%

Os limites de confiança aqui apresentados são adaptações feitas, supondo que o nível de ruído seja normalmente distribuído e que o nível final, em cada uma das normas (NR-15 e FUNDACENTRO), seja utilizado como ruído médio ao longo do tempo de mensuração.

Devido ao número elevado de pontos mensurados, mesmo que as suposições acima sejam falhas em algum sentido, a diferença na confiabilidade dos resultados deverá ser irrelevante para as conclusões.

