

Seleção de Protetores Auriculares Para Eventos de Grande Porte por Meio de Decisão Multicritério Baseada na Atenuação Espectral e na Inteligibilidade da Fala

David Costa de Almeida (UFCG) *davicosta273@gmail.com*

Bruno Pereira Diniz (UFF) *bruno_diniz@id.uff.br*

Daniel Augusto de Moura Pereira (UFCG) *danielmoura@ufcg.edu.br*

Marcos dos Santos (Escola Naval) *marcosdossantos_doutorado_uff@yahoo.com.br*

Resumo

Ambientes de eventos de grande porte, como shows e festivais, apresentam níveis elevados de pressão sonora que podem ultrapassar 100 dB(A), expondo trabalhadores como técnicos de áudio, operadores de palco e equipes de apoio a riscos significativos de perda auditiva induzida por ruído. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo selecionar o protetor auricular mais adequado para trabalhadores expostos a elevados níveis de pressão sonora em eventos de grande porte, considerando simultaneamente aspectos relacionados à proteção auditiva e à preservação da inteligibilidade da fala. Para isso, foi aplicado o método de decisão multicritério *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation – Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors - Decision Maker* (PROMETHEE-SAPEVO-M1), permitindo avaliar diferentes modelos de protetores auriculares com base em critérios técnicos, fisiológicos e operacionais. Entre os critérios analisados destacam-se a atenuação sonora em diferentes faixas de frequência, o desvio padrão das medições de atenuação, o conforto, a portabilidade e o custo de aquisição. A modelagem do problema contou com a participação de um especialista com experiência prática na área de sonorização de eventos, responsável pela atribuição das preferências entre os critérios considerados. Os resultados indicaram que o protetor auricular do tipo concha 3M X5A apresentou desempenho superior entre as alternativas analisadas, seguido pelo modelo 3M H9A e pelo protetor tipo plug Pomp Plus. A aplicação do método multicritério demonstrou-se eficaz para apoiar a tomada de decisão, contribuindo para a redução dos riscos ocupacionais associados à exposição ao ruído em ambientes de eventos de grande porte.

Palavras-Chave: *Perda Auditiva Induzida por Ruído; Protetores Auriculares; Decisão Multicritério; PROMETHEE-SAPEVO-M1; Ruído Ocupacional.*

Abstract

Large event environments, such as concerts and festivals, have high sound pressure levels that can exceed 100 dB(A), exposing workers such as audio technicians, stage operators and support staff to significant risks of noise-induced hearing loss. In this context, the present study aims to select the most appropriate hearing protector for workers exposed to high levels of sound pressure in large events, simultaneously considering aspects related to hearing protection and the preservation of speech intelligibility. For this, the multicriteria decision method Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation – Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors - Decision Maker (PROMETHEE-SAPEVO-M1) was applied, allowing the evaluation of different models of hearing protectors based on technical, physiological and operational criteria. Among the criteria analyzed, sound attenuation in different frequency ranges, standard deviation of attenuation measurements, comfort, portability and acquisition cost stand out. The modeling of the problem had the participation of a specialist with practical experience in the area of event sound, responsible for assigning preferences among the criteria considered. The results indicated that the 3M X5A clamshell ear protector presented superior performance among the alternatives analyzed, followed by the 3M H9A model and the Pomp Plus plug protector. The application of the multicriteria method proved to be effective in supporting decision-making, contributing to the reduction of occupational risks associated with noise exposure in large event environments.

Keywords: *Noise-Induced Hearing Loss; Ear Protectors; Multicriteria Decision; PROMETHEE-SAPEVO-M1; Occupational Noise.*

1. Introdução

Ambientes de grandes eventos, como shows, festivais e produções audiovisuais, caracterizam-se por elevados níveis de pressão sonora, frequentemente superiores a 95 dB(A), podendo ultrapassar 100 dB(A) nas proximidades de caixas acústicas. Esses níveis estão associados a risco significativo de danos auditivos quando a exposição ocorre de forma repetida ou prolongada, como é o caso de operadores e funcionários que trabalham de forma recorrente nesses ambientes. (Mcilvaine; Stewart; Anderson, 2012).

A Organização Mundial da Saúde destaca que a exposição a níveis sonoros elevados em ambientes recreativos e profissionais constitui um problema crescente de saúde pública, especialmente entre trabalhadores do setor de entretenimento e produção de eventos (World Health Organization, 2022). Em 2022, a própria OMS publicou o *Global Standard for Safe Listening Venues and Events*, reforçando a necessidade de controle sistemático da exposição sonora nesses contextos ocupacionais (World Health Organization, 2022).

Do ponto de vista fisiológico, a perda auditiva induzida por ruído ocorre como resultado de exposições frequentes e durante longos períodos a um nível de “ruído” elevado. Estudos demonstram que exposições acima de 85 dB(A) por longos períodos podem provocar alterações estruturais na cóclea, com impacto direto nas células ciliadas externas e nas sinapses auditivas (Le Prell et al., 2022).

Além disso, quando consultadas as normas regulamentadoras do trabalho brasileiras, quanto à nível de exposição ao ruído contínuo ou intermitente, o limite de tolerância para exposição ocupacional ao ruído contínuo é de 85 dB(A) para uma jornada de 8 horas diárias (Brasil, 2022). Esses achados reforçam que a variável “tempo de exposição” é tão relevante quanto o nível de pressão sonora absoluto.

Em ambientes de eventos, o risco ocupacional é ampliado pela natureza intermitente e dinâmica do ruído durante as apresentações, que combina picos de alta intensidade com períodos de exposição contínua. Técnicos de som, iluminadores, operadores e equipes de segurança são frequentemente expostos durante toda a duração do evento, incluindo ensaios e montagens, aumentando a dose sonora diária acumulada que pode passar de 12 horas consecutivas (Mcilvaine; Stewart; Anderson, 2012).

Assim, estratégias de seleção de protetores auriculares devem permitir a redução da exposição a volumes elevados, buscando a redução dos riscos de perda auditiva e promovendo maior qualidade de vida e longevidade aos profissionais envolvidos nas etapas de montagem,

operação e execução das atividades técnicas durante eventos de grande porte (LIPPE, 2025). Apesar da existência de estudos sobre exposição ao ruído em ambientes ocupacionais, observa-se escassez de pesquisas que abordem a seleção de protetores auriculares em ambientes de eventos de grande porte utilizando métodos de decisão multicritério.

O presente estudo tem como objetivo selecionar o protetor auricular mais adequado para trabalhadores expostos a elevados níveis de pressão sonora em ambientes de eventos de grande porte, considerando simultaneamente aspectos relacionados à proteção auditiva e à preservação da comunicação operacional.

Esse processo permite avaliar diferentes alternativas de protetores auriculares com base em critérios técnicos, fisiológicos e operacionais, como a atenuação em faixas de frequência críticas para perda auditiva induzida por ruído, a manutenção da inteligibilidade da fala, o desvio padrão das medições de atenuação, conforto e o custo de aquisição.

A principal contribuição deste estudo consiste na aplicação do método PROMETHEE-SAPEVO-M1 para apoiar a seleção de protetores auriculares em ambientes de eventos de grande porte, considerando simultaneamente critérios relacionados à atenuação espectral do ruído e à preservação da inteligibilidade da fala.

2. Referencial Teórico

2.1 Perda de Audição Induzida por Ruído nas Frequências Mais Prejudiciais ao Ouvido

A perda auditiva induzida por ruído (PAIR) é um dos principais problemas de saúde ocupacional relacionados à exposição prolongada a elevados níveis de pressão sonora. Esse tipo de perda auditiva ocorre quando a energia sonora excessiva provoca danos nas estruturas sensoriais da cóclea, particularmente nas células ciliadas externas, que são responsáveis pela amplificação e pela sensibilidade auditiva (Lippe, 2025).

A PAIR afeta principalmente indivíduos expostos a ambientes ruidosos, como trabalhadores industriais, militares, músicos e profissionais do setor de entretenimento em geral, sendo reconhecida como uma condição que pode reduzir significativamente a qualidade de vida e a capacidade de comunicação dos indivíduos afetados (Basner et al., 2022).

A perda auditiva induzida por ruído apresenta um padrão característico no audiograma conhecido como entalhe audiométrico (*audiometric notch*). Esse padrão ocorre porque

determinadas frequências do espectro sonoro são mais propensas aos danos provocados pela exposição ao ruído.

Estudos indicam que as frequências mais afetadas geralmente situam-se entre 3 kHz e 6 kHz, sendo as frequências próximas de 4 kHz as mais afetadas nos estágios iniciais da PAIR. Frequências mais baixas, como 0,5 kHz, 1 kHz e 2 kHz, tendem a permanecer relativamente preservadas pela audição nos estágios iniciais do dano auditivo, podendo ocorrer uma recuperação parcial em frequências mais altas, como 8 kHz (Nandi; Dhattrak, 2008).

Além disso, pesquisas recentes indicam que alterações fisiológicas no sistema auditivo podem ocorrer antes mesmo da identificação de perdas auditivas permanentes nos exames audiométricos mais usuais. Mudanças iniciais são observadas em frequências mais elevadas do espectro auditivo, incluindo as frequências estendidas acima de 8 kHz, sugerindo que essas regiões da cóclea apresentam maior sensibilidade aos efeitos do ruído, e podem apresentar maior sensibilidade auditiva e desconforto se reproduzidas com potência elevada (Škerková; Kovalová; Mrázková, 2021).

Esses danos iniciais podem evoluir de forma progressiva para frequências mais baixas ao longo do tempo, afetando posteriormente regiões críticas para a percepção da fala e para a comunicação em ambientes ruidosos (Zhou; Merzenich, 2012).

Dessa forma, compreender quais faixas de frequência que são mais vulneráveis aos efeitos da exposição sonora duradoura é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção da perda auditiva ocupacional (Souza, 2025). A identificação dessas frequências críticas permite orientar tanto programas de monitoramento da saúde auditiva quanto a seleção de equipamentos de proteção auditiva capazes de promover maior atenuação nas bandas de frequência mais prejudiciais ao sistema auditivo.

2.2 Frequências da Fala e Sua Importância Para a Inteligibilidade da Comunicação

A comunicação verbal humana depende da transmissão e percepção adequada de diferentes componentes espectrais da fala. O sinal de fala é composto por uma grande faixa de frequências sonoras, mas nem todas contribuem de forma equivalente para a inteligibilidade da comunicação (Bottalico; Murgia, 2023)

Estudos na área de acústica da fala indicam que a maior parte das informações linguísticas relevantes está concentrada em frequências que variam aproximadamente entre 500

Hz e 4.000 Hz, tais faixas são responsáveis pela identificação das principais características fonéticas da fala humana (Lopes, 2019).

Frequências mais baixas, geralmente situadas entre 250 Hz e 500 Hz, estão associadas principalmente à energia fundamental da voz e à percepção do volume e da tonalidade de modo geral da fala (Zhang; Dorman; Spahr, 2010). No entanto, essas frequências possuem baixa contribuição para a compreensão das palavras propriamente ditas.

Por outro lado, as frequências médias e médias-agudas, especialmente entre 1.000 Hz e 4.000 Hz, desempenham papel fundamental na identificação de consoantes e na diferenciação entre fonemas, essenciais para a inteligibilidade da fala em ambientes ruidosos (Lopes, 2019).

Além disso, pesquisas em audiologia demonstram que a perda auditiva em frequências médias e altas pode comprometer significativamente a capacidade de comunicação dos indivíduos, mesmo quando os limiares auditivos em frequências mais baixas permanecem mais preservadas. Isso ocorre porque muitos dos sons consonantais responsáveis pela clareza da fala apresentam energia predominante justamente nas frequências superiores a 3.000 Hz, tornando essas regiões média frequência do espectro auditivo particularmente importantes para a compreensão verbal (Moore, 2016).

Dessa forma, a distribuição espectral da fala humana torna-se de extrema importância no desenvolvimento de estratégias de proteção auditiva em ambientes ocupacionais ruidosos. No caso de trabalhadores expostos a níveis elevados de pressão sonora, a escolha de protetores auriculares deve considerar não apenas a capacidade de atenuação sonora, mas também a preservação das frequências importantes para a comunicação (Kwak; Han, 2021).

2.3 Exposição ao Ruído em Eventos de Grande Porte e Diretrizes de Segurança do Trabalho

Eventos de grande porte, especialmente aqueles que utilizam sistemas de sonorização amplificada, apresentam níveis elevados de pressão sonora que podem representar risco significativo à saúde auditiva de indivíduos expostos por períodos prolongados e de forma repetitiva. Em ambientes como shows, festivais e casas de espetáculo, o som amplificado constitui parte essencial da experiência do evento, porém a exposição contínua a esses níveis pode resultar em danos auditivos temporários ou permanentes (De Poortere, 2026).

Nesse contexto, organizações internacionais têm desenvolvido diretrizes e normas voltadas à promoção da audição segura em ambientes de entretenimento, com o objetivo de reduzir os riscos associados à exposição ao som amplificado de alta potência (World Health Organization, 2022).

Entre as principais recomendações estabelecidas nas diretrizes internacionais de segurança sonora está a definição de limites para o nível de pressão sonora em eventos. Estudos e monitoramentos realizados em locais de música ao vivo indicam que os níveis sonoros frequentemente ultrapassam 100 dB, especialmente em apresentações musicais ao vivo e em espaços fechados de menor dimensão ou espaços abertos muito próximos as caixas acústicas (De Poortere, 2026).

Esses níveis de exposição podem ser suficientes para provocar danos auditivos quando a exposição ocorre de forma repetida ou por períodos prolongados, evidenciando a necessidade de mecanismos de controle e monitoramento dos níveis sonoros em ambientes de entretenimento (World Health Organization, 2022).

Diante desse cenário, as normas internacionais recomendam a adoção de diversas medidas de controle para reduzir o risco de lesões auditivas associadas ao ruído em eventos (World Health Organization, 2022). Entre essas medidas destacam-se a implementação de limites máximos de pressão sonora, o monitoramento em tempo real dos níveis sonoros durante os eventos, a disponibilização de protetores auriculares para o público e trabalhadores, além da criação de áreas de descanso acústico, conhecidas como quiet zones.

2.4 Tomada de Decisão Multicritério

Os métodos de apoio à decisão multicritério (*Multiple Criteria Decision Analysis* – MCDA) têm sido amplamente utilizados para auxiliar processos decisórios que envolvem múltiplos critérios, frequentemente conflitantes, permitindo a análise estruturada de diferentes alternativas em situações complexas. Esses métodos possibilitam integrar variáveis quantitativas e qualitativas no processo de avaliação, proporcionando maior transparência e racionalidade na tomada de decisão. De acordo com Gomes et al. (2021), a abordagem multicritério busca apoiar o decisor na estruturação do problema e na análise das alternativas disponíveis, considerando simultaneamente diferentes critérios de avaliação e as preferências dos envolvidos no processo decisório.

No contexto da engenharia e da gestão, os métodos multicritério são particularmente úteis em situações em que decisões precisam considerar múltiplos fatores técnicos, econômicos e operacionais. Segundo Yannis et al. (2022), as abordagens MCDA permitem comparar alternativas com base em diferentes dimensões de desempenho, possibilitando identificar soluções que melhor atendam aos objetivos definidos no problema de decisão. Esses métodos contribuem para reduzir a subjetividade das escolhas, ao mesmo tempo em que estruturam de forma sistemática as preferências dos decisores e as relações de dominância entre as alternativas analisadas.

2.5 Método PROMETHEE-SAPEVO-M1

O método PROMETHEE-SAPEVO-M1 consiste em uma abordagem híbrida de apoio multicritério à decisão (MCDA) que integra os métodos *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE) e *Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors – Multi Decision Makers* (SAPEVO-M). Essa integração permite manipular simultaneamente dados quantitativos e qualitativos, utilizando entradas cardinais e ordinais, respectivamente (Moreira et al., 2022).

Enquanto o método PROMETHEE é responsável pela modelagem de superação (outranking) entre alternativas com base em funções de preferência e fluxos de dominância, o método SAPEVO-M é utilizado para obter pesos dos critérios a partir de comparações ordinais, convertendo julgamentos linguísticos dos decisores em valores cardinais (Moreira, 2020).

O procedimento do método pode ser estruturado nas seguintes etapas:

Inicialmente define-se o conjunto de alternativas e o conjunto de critérios de avaliação.

Conforme a Equação 1:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \quad (1)$$

o conjunto de alternativas conforme a Equação 2:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\} \quad (2)$$

o conjunto de critérios.

O desempenho das alternativas é organizado conforme a Matriz de avaliação:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nk} \end{bmatrix}$$

onde a_{ij} representa o desempenho da alternativa a_i no critério c_j .

Os critérios podem possuir natureza qualitativa ou quantitativa, sendo tratados de maneira distinta ao longo do processo.

Os critérios qualitativos são avaliados por meio de uma escala ordinal de preferência, convertendo expressões linguísticas em valores numéricos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Escala ordinal de preferência

Expressão verbal	Pontuação
Absolutamente pior	-3
Muito pior	-2
Pior	-1
Equivalente	0
Melhor	1
Muito melhor	2
Absolutamente melhor	3

Fonte: Adaptado do (Moreira et. al, 2022)

Essa escala permite representar as relações de preferência entre alternativas de forma estruturada.

Após a atribuição das pontuações, os valores são normalizados por meio da Equação 3:

$$v = \frac{\sum a_{ih} - \min(a_{ih})}{\max(a_{ih}) - \min(a_{ih})} \quad (3)$$

Para critérios quantitativos aplica-se a estrutura do método PROMETHEE, definindo para cada critério:

- direção de otimização (maximização ou minimização)
- tipo de função de preferência
- parâmetros de indiferença q
- parâmetros de preferência p

As funções de preferência mais utilizadas incluem:

- função usual

- função em U
- função em V
- função nível
- função V-shape I
- função gaussiana

A diferença de desempenho entre duas alternativas é dada pela Equação 4:

$$d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b) \quad (4)$$

A partir dessa diferença calcula-se o grau de preferência como observado na Expressão 5:

$$P_j(a, b) \quad (5)$$

Os pesos dos critérios são obtidos por meio de comparações ordinais entre critérios, realizadas pelo decisor.

Para cada par de critérios c_i e c_j , define-se a relação de preferência, observa-se na Expressão 6:

$$\delta(c_i, c_j) \quad (6)$$

A soma das comparações gera um vetor de pontuações observado na Equação 7:

$$V_i = \sum \delta(c_i, c_j) \quad (7)$$

Posteriormente os valores são normalizados na Equação 8:

$$v_i = \frac{\sum c_{ij} - \text{minsum}}{\text{maxsum} - \text{minsum}} \quad (8)$$

onde:

$$\text{minsum} = (n - 1)(-3 \text{ da tabela 1})$$

$$\text{maxsum} = (n - 1)(3 \text{ da tabela 1})$$

O vetor resultante corresponde aos pesos dos critérios.

Após obter as preferências individuais e os pesos dos critérios, calcula-se o índice global de preferência entre cada par de alternativas como pode ser observado na Equação 9:

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b) w_j \quad (9)$$

onde:

- $P_j(a, b)$ é a preferência da alternativa a sobre b no critério j
- w_j é o peso do critério.

Esse índice representa o grau de dominância de uma alternativa sobre outra.

A partir da matriz de índices globais calcula-se os fluxos de superação, que definem a ordenação das alternativas.

Fluxo positivo

A Equação 10 representa o quanto uma alternativa domina as demais:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (10)$$

Fluxo negativo

A Equação 11 representa o quanto uma alternativa é dominada pelas demais:

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (11)$$

Fluxo líquido

A Equação 12 define a ordenação final das alternativas:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (12)$$

O método permite diferentes análises de preferência para explorar a sensibilidade do problema:

PROMETHEE I — superação parcial

Baseia-se nos fluxos positivo e negativo.

PROMETHEE II — superação completa

Utiliza o fluxo líquido para gerar um ranking completo das alternativas.

Análise por intervalos

A Equação 13 e 14 baseia-se em intervalos calculados por erro padrão:

$$x_{a_i} = \phi(a_i) - \alpha \sigma_{a_i} \quad (13)$$

$$y_{a_i} = \phi(a_i) + \alpha \sigma_{a_i} \quad (14)$$

O método também permite uma análise adicional baseada em limiar de veto, que impede que uma alternativa seja preferível caso apresente desempenho extremamente inferior em determinado critério.

O limiar de veto pode ser definido como observado na Equação 15:

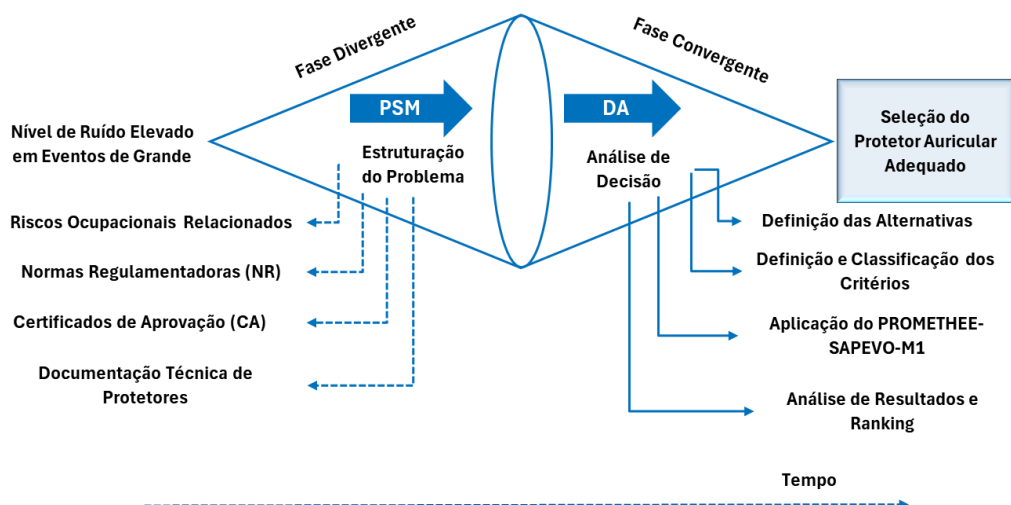
$$v_j = \max(a_{ij}) \quad (15)$$

Esse procedimento permite avaliar relações específicas entre alternativas dentro de cada critério.

3. Estruturação do Problema

A estruturação do problema desta pesquisa foi desenvolvida a partir da análise do ambiente de trabalho em grandes eventos, caracterizado pela exposição frequente dos profissionais a elevados níveis de pressão sonora. Nesse contexto, foram considerados aspectos relacionados aos riscos ocupacionais associados ao ruído, às normas regulamentadoras aplicáveis e à necessidade de utilização de equipamentos de proteção individual adequados. Além disso, foram analisados os Certificados de Aprovação (CA) e a relatórios técnicos de diferentes modelos de protetores auriculares disponíveis no mercado, permitindo compreender as características e os níveis de atenuação sonora oferecidos por cada alternativa. A estruturação do problema pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Estruturação do problema.



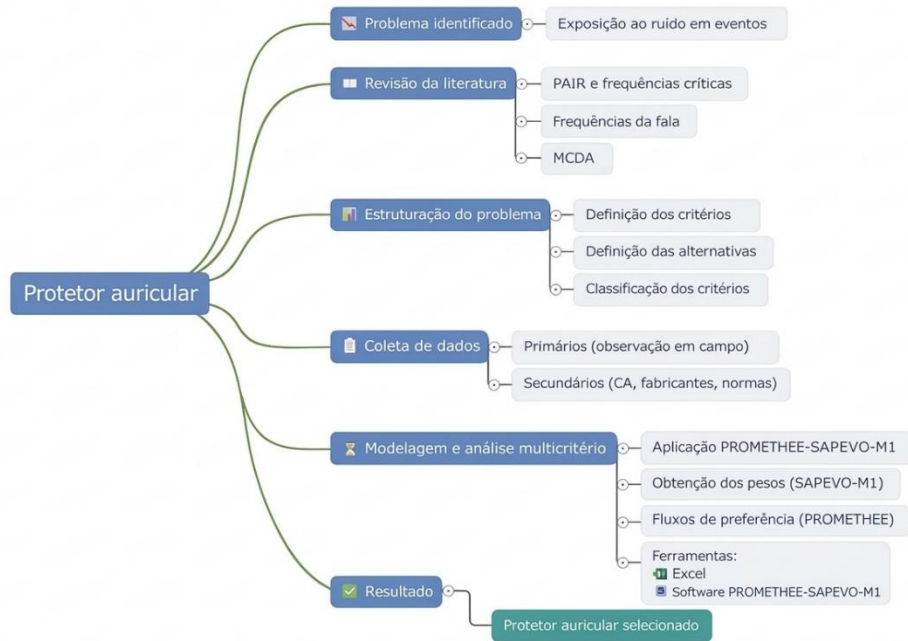
Fonte: Autores (2026)

Com base nessas informações, foi realizada a etapa de estruturação do problema utilizando uma abordagem fundamentada em métodos de apoio multicritério à decisão. Foi conduzido um estudo dos critérios de decisão relevantes para a escolha do protetor auricular e considerando fatores técnicos, operacionais e econômicos associados ao desempenho dos equipamentos. Nessa fase, foram identificadas as alternativas disponíveis e definidos os critérios de avaliação que permitiriam comparar os diferentes protetores auditivos de forma sistemática e estruturada.

Posteriormente, na fase convergente do processo, é esperado a definição e classificação dos critérios, a avaliação das alternativas consideradas e a análise dos resultados obtidos por meio do ranking gerado pelo método.

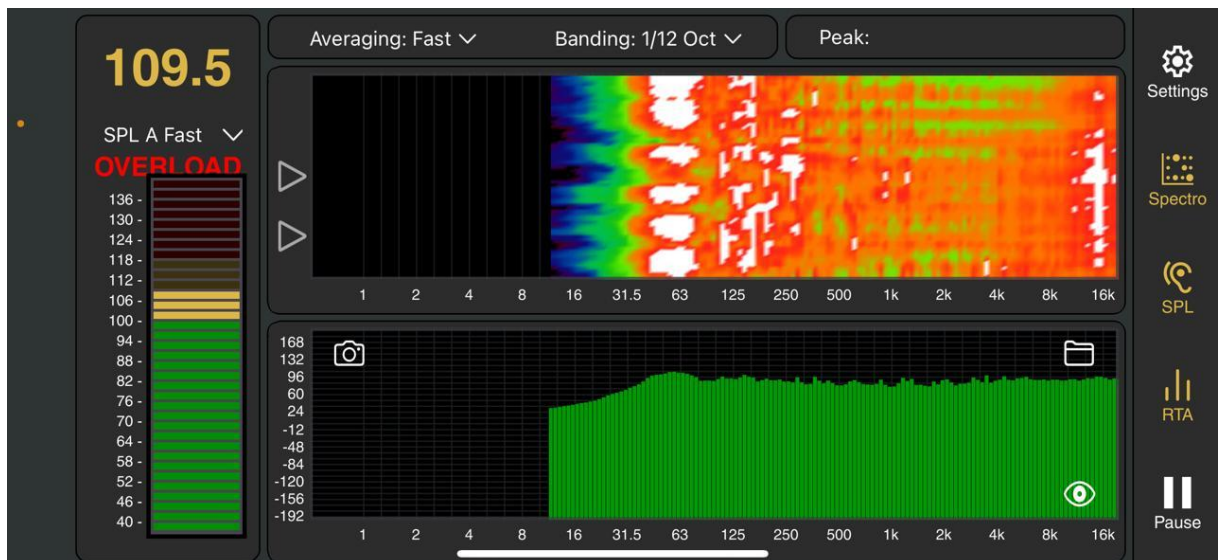
4. Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como de abordagem quantitativa, de natureza aplicada e caráter exploratório, utilizando métodos de decisão multicritério para apoiar a seleção de protetores auriculares em ambientes de eventos de grande porte. O estudo tem como finalidade propor uma solução prática para um problema real, por meio da análise estruturada de critérios técnicos, operacionais e fisiológicos. Quanto aos objetivos, a pesquisa classifica-se como avaliativa, uma vez que busca examinar o desempenho das alternativas consideradas com base em múltiplos critérios. Para o alcance desses objetivos, foram adotados procedimentos metodológicos compatíveis com a proposta do estudo, incluindo pesquisa de campo e análise sistemática de dados. O fluxo metodológico adotado pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxo da Metodologia Adotada.


Fonte: Autores (2026)

A Figura 3 é uma captura feita através do software de medição acústica (Smaart), que mostra o nível de pressão sonora (dB), assim como as faixas de frequências que estão sendo reproduzidas próximo ao técnico de áudio durante o evento apresentam distribuição espectral aproximadamente uniforme.

Figura 3 – Captura realizada em campo.


Fonte: Autores (2026)

A adequação dos critérios ocorreu conforme necessário de acordo com informações que são obtidas através do certificado de aprovação no site <https://consultaca.com/>, normas regulamentadoras brasileiras (NR) relacionadas à exposição ocupacional ao ruído e tabelas de atenuação por frequência fornecidas pelos fabricantes, assim, foi possível estruturar os critérios do modelo de decisão e caracterizar o desempenho das alternativas analisadas.

Para a modelagem do problema de decisão foi considerado um especialista com experiência prática no setor de eventos, atuante como técnico de áudio profissional há aproximadamente sete anos. O especialista possui experiência em atividades de montagem, operação e monitoramento de sistemas de sonorização em eventos de grande porte, incluindo controle de níveis de pressão sonora e acompanhamento de equipes técnicas. Essa experiência foi utilizada para apoiar a definição dos critérios e a avaliação das alternativas consideradas no estudo.

No processo de decisão foram consideradas alternativas correspondentes a diferentes modelos de protetores auriculares disponíveis no mercado, todos com Certificado de Aprovação (CA) válido. Foram considerados 15 parâmetros principais: Conforto, Portabilidade, Proteção 250 Hz, Desvio padrão da atenuação 250Hz, Proteção 500 Hz, Desvio padrão da atenuação 500Hz, Proteção 1000 Hz, Desvio padrão da atenuação 1000 Hz, Proteção 2000 Hz, Desvio padrão da atenuação 2000 Hz, Proteção 4000 Hz, Desvio padrão da atenuação 4000 Hz, Proteção 8000 Hz, Desvio padrão da atenuação 8000 Hz e Custo.

O desvio padrão da atenuação em cada faixa de frequência em teoria não era necessário, foi incorporado aos parâmetros de análise, uma vez que, em alguns casos, esses valores representavam até 30% da atenuação nominal informada. Essa variabilidade pode comprometer a precisão das medições obtidas em laboratório. Ainda assim, tais procedimentos de avaliação são amplamente aceitos no âmbito da segurança do trabalho no Brasil. Diante disso, como forma de mitigar essa limitação metodológica, o especialista optou por incluir o desvio padrão correspondente a cada frequência na análise.

Na Figura 4 é possível observar a imagem de cada um dos protetores que são alternativas.

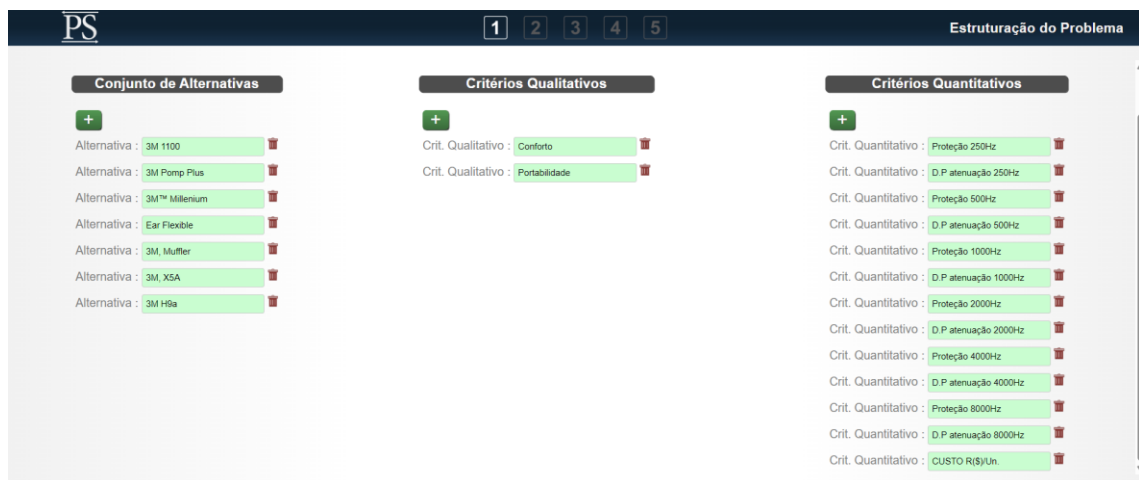
Figura 4 – Imagens das Alternativas.



Fonte: Autores (2026)

É possível ver o esquema abaixo na Figura 5 o conjunto de alternativas, assim como os critérios separados de acordo com sua natureza quantitativa ou qualitativa.

Figura 5 – Definição das alternativas e classificação dos critérios em qualitativos e quantitativos.



Fonte: Autores (2026)

Para a resolução desse problema foi escolhido o método de tomada de decisão multicritério, mais especificamente o método PROMETHEE-SAPEVO-M1 a partir do Framework de Seleção de Métodos de Decisão Multicritério de Diniz et.al, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 – Framework para seleção de Método de Análise de Decisão Multicritério.


DADOS DE ENTRADA	GRUPO DE DECISÃO	TIPO DE COMPENSAÇÃO	GERA PESOS	HÍBRIDO	MÉTODO MULTICRITÉRIO
CARDINAL E ORDINAL	MONODECISOR	COMPENSATÓRIO	SIM	SIM	DEMATEL-AHP-TOPSIS
CARDINAL E ORDINAL	MONODECISOR	COMPENSATÓRIO	SIM	SIM	PROMETHEE-SAPEVO-M1
CARDINAL E ORDINAL	MONODECISOR	COMPENSATÓRIO	SIM	SIM	SWARA-MOORA
CARDINAL E ORDINAL	MONODECISOR	COMPENSATÓRIO	SIM	SIM	SWARA-MOORA-3NAG

Fonte: Autores (2026)

A aplicação do método foi dada devido à natureza do problema, caracterizado por dados de entrada do tipo ordinal, com a participação de um único decisor e o método de agregação é compensatório.

Inicialmente foi estruturada a matriz de decisão, na qual as alternativas correspondem aos modelos de protetores auriculares analisados e os critérios representam os fatores técnicos e operacionais considerados no estudo. Conforme a Figura 7 e Figura 8.

Figura 7 - Tabela estruturada da matriz de decisão.

	MAX	MIN	MAX	MIN	MIN	MIN	MAX	MIN
	Proteção 250Hz db	D.P atenuação 250Hz	Proteção 500Hz db	D.P atenuação 500Hz	Proteção 1000Hz db	D.P atenuação 1000Hz	Proteção 2000Hz db	D.P atenuação 2000Hz
3M 1100 - CA: 5674	18	6	22	7	23	6	30	3
3M Pomp Plus - CA: 5745	23	5	27	6	23	4	29	4
3M™ Millenium - CA: 11882	21	6	24	6	23	5	28	5
Ear Flexible - CA: 44781	20	7	23	6	23	6	28	4
3M, Muffler - CA: 14235	18	5	27	6	35	6	32	5
3M, X5A - CA: 32841	25	3	38	4	42	3	37	2
3m H9a - CA: 12189	18	2	29	3	32	3	33	2

Fonte: Autores (2026)

Figura 8 - Tabela estruturada da matriz de decisão.

MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MIN
Proteção 4000Hz db	D.P atenuação 4000Hz	Proteção 8000Hz db	D.P atenuação 8000Hz	CONFORTO USO PROLONGADO	CUSTO R(\$)/Un.	PORTABILIDADE
35	7	35	7 ALTO		R\$ 3,30	ALTA
31	7	41	6 ALTO		R\$ 4,79	ALTA
28	6	36	9 ALTO		R\$ 8,73	ALTA
34	5	35	7 ALTO		R\$ 6,20	ALTA
30	5	30	5 INTERMEDIÁRIO		R\$ 66,21	INTERMEDIÁRIO
38	3	38	3 INTERMEDIÁRIO		R\$ 409,16	BAIXA
32	2	34	5 INTERMEDIÁRIO		R\$ 206,00	INTERMEDIÁRIO

Fonte: Autores (2026)

Em seguida, o especialista atribuiu preferências ordinais entre os critérios, permitindo a obtenção dos pesos relativos por meio da modelagem do SAPEVO-M1 e posteriormente, esses pesos foram utilizados no procedimento de ordenação baseado nos fluxos de preferência do método PROMETHEE, resultando na classificação final das alternativas.

O processamento das etapas matemáticas do método foi realizado com auxílio do software PROMETHEE-SAPEVO-M1 (Moreira; Santos; Gomes, 2020), permitindo a organização da matriz de decisão, a normalização dos valores e o cálculo dos fluxos de

preferência necessários para a obtenção do ranking final das alternativas. A Figura 9 mostra a tela inicial do software.

Figura 9 – Tela inicial do software



Fonte: Autores (2026)

5. Resultados e Discussão

A Figura 10 e 11 apresentam a etapa de avaliação qualitativa das preferências entre as alternativas considerando os critérios Conforto e Portabilidade, dentro da aplicação do método de decisão multicritério PROMETHEE-SAPEVO-M1. Nesse método, critérios qualitativos são avaliados por meio de comparações par a par entre as alternativas, nas quais o decisor expressa julgamentos de preferência utilizando uma escala semântica (por exemplo: equivalente, melhor, muito melhor ou absolutamente melhor). No painel à esquerda são exibidas as comparações referentes ao critério Conforto, enquanto no painel à direita estão as comparações relativas ao critério Portabilidade. Cada linha representa a comparação entre duas alternativas de protetores auditivos da marca 3M, permitindo identificar o grau de preferência de uma opção em relação à outra para cada critério analisado. Essas avaliações qualitativas são posteriormente convertidas em valores numéricos de preferência, que alimentam o modelo PROMETHEE-SAPEVO-M1 e possibilitam o cálculo dos índices de dominância entre as alternativas, contribuindo para a construção do ranking final das opções avaliadas.

Figura 10 – Seleção de preferências das alternativas mediante os critérios qualitativos



PS 1 2 3 4 5 Avaliação Qualitativa

Preferências no critério Conforto :

3M 1100 é **equivalente** que 3M Pump Plus .

3M 1100 é **equivalente** que 3M™ Millenium.

3M 1100 é **equivalente** que Ear Flexible.

3M 1100 é **melhor** que 3M, Muffler.

3M 1100 é **melhor** que 3M, X5A.

3M 1100 é **melhor** que 3M H9a.

3M Pump Plus é **equivalente** que 3M™ Millenium.

3M Pump Plus é **equivalente** que Ear Flexible.

3M Pump Plus é **melhor** que 3M, Muffler.

3M Pump Plus é **melhor** que 3M, X5A.

3M Pump Plus é **melhor** que 3M H9a.

Preferências no critério Portabilidade:

3M 1100 é **equivalente** que 3M Pump Plus .

3M 1100 é **equivalente** que 3M™ Millenium.

3M 1100 é **equivalente** que Ear Flexible.

3M 1100 é **muito melhor** que 3M, Muffler.

3M 1100 é **absolutamente melhor** que 3M, X5A.

3M 1100 é **muito melhor** que 3M H9a.

3M Pump Plus é **equivalente** que 3M™ Millenium.

3M Pump Plus é **equivalente** que Ear Flexible.

3M Pump Plus é **muito melhor** que 3M, Muffler.

3M Pump Plus é **absolutamente melhor** que 3M, X5A.

3M Pump Plus é **muito melhor** que 3M H9a.

PROMETHEE-SAPEVO-M1 Prosseguir >>

Fonte: Autores (2026)

Figura 11 – Seleção de preferências das alternativas mediante os critérios qualitativos (Parte 2)



PS 1 2 3 4 5 Avaliação Qualitativa

3M Pump Plus é **melhor** que 3M H9a.

3M™ Millenium é **equivalente** que Ear Flexible.

3M™ Millenium é **melhor** que 3M, Muffler.

3M™ Millenium é **melhor** que 3M, X5A.

3M™ Millenium é **melhor** que 3M H9a.

Ear Flexible é **melhor** que 3M, Muffler.

Ear Flexible é **melhor** que 3M, X5A.

Ear Flexible é **melhor** que 3M H9a.

3M, Muffler é **pior** que 3M, X5A.

3M, Muffler é **equivalente** que 3M H9a.

3M, X5A é **melhor** que 3M H9a.

3M Pump Plus é **muito melhor** que 3M H9a.

3M™ Millenium é **equivalente** que Ear Flexible.

3M™ Millenium é **muito melhor** que 3M, Muffler.

3M™ Millenium é **absolutamente melhor** que 3M, X5A.

3M™ Millenium é **melhor** que 3M H9a.

Ear Flexible é **muito melhor** que 3M, Muffler.

Ear Flexible é **absolutamente melhor** que 3M, X5A.

Ear Flexible é **muito melhor** que 3M H9a.

3M, Muffler é **melhor** que 3M, X5A.

3M, Muffler é **equivalente** que 3M H9a.

3M, X5A é **pior** que 3M H9a.

PROMETHEE-SAPEVO-M1 Prosseguir >>

Fonte: Autores (2026)

Para proporcionar uma modelagem e análise mais consistentes, o método permite a geração de diferentes tipos de resultados a partir da inserção de dados numéricos e da definição das preferências dos decisores. Entre esses resultados, destaca-se o índice de preferência global, que expressa o nível de dominância de cada alternativa. Além disso, o método possibilita a quantificação dos fluxos positivos, negativos e líquidos, utilizados para interpretar o desempenho relativo das opções no processo de avaliação. A Figura 12 faz referência a esses índices e fluxos.

Figura 12 – Índices de preferência global e fluxos de importância

Índices de Preferência Global Ponderados e Fluxos de Importância										
	3M 1100	3M Pump Plus	3M™ Millenium	Ear Flexible	3M, Muffler	3M, X5A	3M H9a	Fluxo Positivo	Fluxo Líquido	Intervalos (erro padrão = 0.05)
3M 1100	0	0.019	0.024	0.024	0.027	0.011	0.021	0.126	-0.084	x = -0.134 y = -0.034
3M Pump Plus	0.035	0	0.049	0.039	0.037	0.016	0.021	0.197	0.053	x = 0.003 y = 0.103
3M™ Millenium	0.03	0.005	0	0.025	0.026	0.011	0.021	0.118	-0.109	x = -0.159 y = -0.059
Ear Flexible	0.02	0.01	0.024	0	0.032	0.011	0.026	0.123	-0.08	x = -0.13 y = -0.03
3M, Muffler	0.03	0.015	0.03	0.02	0	0.009	0.004	0.108	-0.12	x = -0.17 y = -0.07
3M, X5A	0.055	0.05	0.055	0.055	0.056	0	0.031	0.302	0.22	x = 0.17 y = 0.27
3M H9a	0.04	0.045	0.045	0.04	0.05	0.024	0	0.244	0.12	x = 0.07 y = 0.17
Fluxo Negativo	0.21	0.144	0.227	0.203	0.228	0.082	0.124			

Fonte: Autores (2026)

Após a estruturação da tabela com as características, foi possível realizar a ordenação a partir do método, obtendo os resultados dos pesos observados na Figura 13.

Figura 13 – Tabela de Pesos dos Critérios

	Pesos dos Critérios
Proteção 250Hz db	0.075
D.P atenuação 250Hz	0.075
Proteção 500Hz db	0.075
D.P atenuação 500Hz	0.075
Proteção 1000Hz db	0.075
D.P atenuação 1000Hz	0.075
Proteção 2000Hz db	0.075
D.P atenuação 2000Hz	0.075
Proteção 4000Hz db	0.075
D.P atenuação 4000Hz	0.075
Proteção 8000Hz db	0.075
D.P atenuação 8000Hz	0.075
CUSTO R(\$)/Un.	0.054
CONFORTO USO PROLONGADO	0.029
PORTABILIDADE	0.022

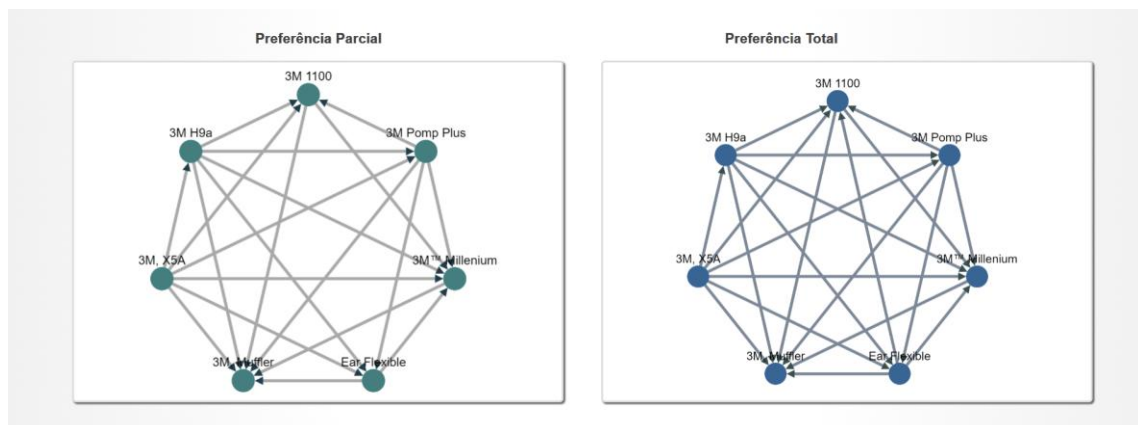
Fonte: Autores (2026)

É possível observar as relações entre os pesos das alternativas na Figura 13. Os critérios que se mostraram mais proeminentes nessa análise foram as faixas de frequência que foram propostas como objeto de interesse, de peso 0,075, assim como o desvio padrão associado a cada frequência também obtiveram o mesmo peso (0,075), seguido pelo custo (0,054), conforto durante uso (0,029), por fim a portabilidade (0,022). Todos os critérios apresentam relevância

no processo decisório, mas as faixas de frequência que vão ser atenuadas e seus respectivos desvios padrão se mostraram à frente dos demais critérios.

Na Figura 14, observam-se os grafos de preferência, nos quais a alternativa de melhor desempenho apresenta relações de dominância sobre as demais, enquanto nenhuma das demais alternativas estabelece relação de preferência sobre ela. E o ranking final das alternativas pode ser visto na Figura 15.

Figura 14 – Grafos de preferência



Fonte: Autores (2026)

Figura 15 – Ranking final das alternativas

Ranking Final

3M, X5A	=	0.22	
3M H9a	=	0.12	
3M Pump Plus	=	0.053	
Ear Flexible	=	-0.08	
3M 1100	=	-0.084	
3M™ Millenium	=	-0.109	
3M, Muffler	=	-0.12	

PROMETHEE-SAPEVO-M1

Fonte: Autores (2026)

Considerando o ranking final obtido, é possível interpretar o grafo de preferência total (grafo de dominância) de forma coerente com os fluxos líquidos apresentados. No grafo, as alternativas dominantes são aquelas que disparam maior número de setas para as demais

alternativas e recebem o mínimo possível, indicando maior capacidade de superação nas comparações par a par.

A análise do ranking demonstra que a alternativa 3M X5A apresentou o maior fluxo líquido de preferência (0,22), configurando-se como a alternativa mais dominante do conjunto analisado. Esse resultado indica que, no grafo de preferência total, essa alternativa tende a direcionar um número elevado de setas para as demais alternativas e receber poucas relações de dominância. Em termos práticos, isso significa que a 3M X5A supera a maior parte das alternativas quando avaliadas segundo os critérios estabelecidos, consolidando-se como a opção mais favorável.

Na sequência, a alternativa 3M H9A, com fluxo líquido de 0,12, também apresenta comportamento dominante no grafo de preferências. Embora com menor intensidade de dominância em comparação à primeira colocada, essa alternativa ainda estabelece relações de preferência favoráveis em diversas comparações par a par, indicando um desempenho consistente dentro do conjunto de alternativas avaliadas.

A alternativa 3M Pomp Plus, em terceiro lugar com valor de 0,053, apresenta dominância moderada. No grafo de preferência, isso se reflete em um equilíbrio entre setas emitidas e recebidas, ainda que com leve predominância das relações favoráveis. Esse comportamento sugere que a alternativa supera algumas concorrentes diretas, porém também é superada por alternativas com desempenho superior.

Por outro lado, as alternativas que apresentam fluxo líquido negativo no ranking tendem a assumir posições mais dominadas no grafo de preferência total. A alternativa Ear Flexible (-0,08) e 3M 1100 (-0,084) apresentam desempenho inferior, indicando que recebem maior número de setas das demais alternativas, ainda que mantenham algumas relações de dominância pontuais.

Já as alternativas 3M Millennium (-0,109) e 3M Muffler (-0,12) ocupam as últimas posições no ranking, caracterizando-se como as alternativas mais dominadas do conjunto analisado. No grafo de preferência total, essas alternativas tendem a receber maior quantidade de setas direcionadas por outras opções, evidenciando menor desempenho relativo frente aos critérios estabelecidos.

De maneira geral, a interpretação conjunta do grafo de dominância e do ranking final permite identificar uma estrutura clara de preferência entre as alternativas avaliadas. As alternativas 3M X5A, 3M H9A e 3M Pomp Plus apresentam comportamento dominante no

sistema de comparações, enquanto as demais alternativas apresentam níveis progressivamente maiores de dominância recebida.

6. Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo selecionar o protetor auricular mais adequado para trabalhadores expostos a elevados níveis de pressão sonora em ambientes de eventos de grande porte, considerando simultaneamente aspectos relacionados à proteção auditiva e à preservação da comunicação operacional. Para atingir esse objetivo, foi aplicada uma abordagem de decisão multicritério por meio do método PROMETHEE-SAPEVO-M1, permitindo a avaliação estruturada de diferentes alternativas de protetores auriculares com base em critérios técnicos, fisiológicos e operacionais.

A aplicação do método possibilitou analisar simultaneamente múltiplos critérios relevantes para o problema de decisão, incluindo níveis de atenuação sonora em diferentes faixas de frequência, desvio padrão das medições de atenuação, conforto durante uso prolongado, portabilidade e custo de aquisição. A partir da modelagem da matriz de decisão e da atribuição das preferências pelo especialista participante, foi possível estabelecer um ranking final das alternativas avaliadas. Os resultados indicaram que o protetor auricular 3M X5A apresentou desempenho mais favorável, seguido pelas alternativas 3M H9A e 3M Pomp Plus.

A análise dos resultados também evidenciou que os critérios relacionados à atenuação sonora nas faixas de frequência mais prejudiciais ao sistema auditivo, bem como seus respectivos desvios padrão, exerceram maior influência no processo de decisão. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que o principal objetivo da seleção dos protetores auriculares é reduzir a exposição ao ruído ocupacional, contribuindo para a prevenção da perda auditiva e para a melhoria das condições de saúde e segurança dos trabalhadores. Dessa forma, a utilização de métodos de decisão multicritério mostrou-se uma ferramenta eficaz para apoiar a escolha de equipamentos de proteção individual em contextos complexos, nos quais diferentes critérios precisam ser avaliados simultaneamente.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam o potencial da abordagem multicritério como ferramenta de apoio à decisão na área de segurança do trabalho, contribuindo para processos mais estruturados de seleção de equipamentos de proteção auditiva em ambientes ocupacionais caracterizados por elevados níveis de ruído. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do número de especialistas participantes no processo de

decisão, permitindo a incorporação de diferentes perspectivas profissionais, como engenheiros de segurança do trabalho, médicos do trabalho e técnicos de áudio. Além disso, futuros estudos podem aplicar o modelo proposto em outros contextos ocupacionais caracterizados por elevados níveis de ruído, bem como testar diferentes métodos de decisão multicritério para comparação de resultados. Recomenda-se, ainda, a realização de medições acústicas em campo durante eventos reais, com a utilização dos protetores auriculares selecionados, a fim de validar os resultados do modelo multicritério e avaliar, de forma mais robusta, a eficácia desses dispositivos em condições reais de exposição ocupacional ao ruído.

REFERÊNCIAS

- BASNER, Mathias et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health. **The lancet**, v. 383, n. 9925, p. 1325-1332, 2014.
- BOTTALICO, Pasquale; MURGIA, Silvia. The effect of the frequency and energetic content of broadband noise on the Lombard effect and speech intelligibility. In: *Acoustics*. MDPI, 2023. p. 898-908.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 15 (NR-15): atividades e operações insalubres**. Brasília: MTE, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho>. Acesso em: 28 fev. 2026.
- DE POORTERE, Nele et al. Large-scale music events can cause subclinical hearing damage. **Scientific Reports**, 2026.
- KWAK, Chanbeom; HAN, Woojae. The effectiveness of hearing protection devices: a systematic review and meta-analysis. **International journal of environmental research and public health**, v. 18, n. 21, p. 11693, 2021.
- LE PRELL, Colleen G. **Prevention of Noise-Induced Hearing Loss Using Investigational Medicines for the Inner Ear: Previous Trial Outcomes Should Inform Future Trial Design**. *Antioxidants & Redox Signaling*, v. 36, n. 16–18, p. 1171–1202, 2022.
- LIPPE, Marcela Maria Ferreira. Prevenção da perda auditiva induzida por ruído (PAIR): abordagens efetivas na medicina ocupacional. **Journal of Medical and Biosciences Research**, v. 2, n. 1, p. 255-264, 2025.
- LOPES, J. C. **Frequências da fala e inteligibilidade da comunicação humana**. 2019.
- MCILVAINE, Devon; STEWART, Michael; ANDERSON, Robert. Noise exposure levels for musicians during rehearsal and performance times. **Medical Problems of Performing Artists**, v. 27, n. 1, p. 31-36, 2012.
- MOREIRA, Miguel Ângelo Lellis et al. Evaluation of drones for public security: a multicriteria approach by the PROMETHEE-SAPEVO-M1 systematic. **Procedia Computer Science**, v. 199, p. 125-133, 2022.
- MOREIRA, MIGUEL ÂNGELO LELLIS, Marcos dos SANTOS, and CARLOS FRANCISCO SIMÕES GOMES. "Método Híbrido PROMETHEE-SAPEVO-M1: Uma Evolução do Método PROMETHEE." *Simpósio de Engenharia de Produção. XXVII* (2020).
- MOREIRA, Miguel Ângelo Lellis; SANTOS, Marcos dos; GOMES, Carlos Francisco Simões. PROMETHEE-SAPEVO-M1 Software Web (v.1). 2020.
- NANDI, Subroto S.; DHATRAK, Sarang V. Occupational noise-induced hearing loss in India. **Indian journal of occupational and environmental medicine**, v. 12, n. 2, p. 53-56, 2008.



PEREIRA, Daniel Augusto de Moura; ARAÚJO, Diogo Sebastião Pereira; SANTOS, Jamily Ferreira dos; DINIZ, Bruno Pereira. Metodika - Ferramenta Online de Apoio ao Desenvolvimento de Metodologia Científica (v1) 2025.

ŠKERKOVÁ, Michaela; KOVALOVÁ, Martina; MRÁZKOVÁ, Eva. High-frequency audiometry for early detection of hearing loss: a narrative review. **International journal of environmental research and public health**, v. 18, n. 9, p. 4702, 2021.

SOUZA, Vinicius Silva Martins de. Perda auditiva induzida por ruído em pequenas empresas: percepção dos trabalhadores, barreiras e desafios na prevenção. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION et al. **WHO global standard for safe listening venues and events**. World Health Organization, 2022.

YANNIS, George et al. State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector. **Journal of traffic and transportation engineering (English edition)**, v. 7, n. 4, p. 413-431, 2020.

ZHANG, Ting; DORMAN, Michael F.; SPAHR, Anthony J. Information from the voice fundamental frequency (F0) region accounts for the majority of the benefit when acoustic stimulation is added to electric stimulation. **Ear and hearing**, v. 31, n. 1, p. 63-69, 2010.

ZHOU, Xiaoming; MERZENICH, Michael M. Environmental noise exposure degrades normal listening processes. **Nature communications**, v. 3, n. 1, p. 843, 2012.