



Utilização de Metodologia Multicritério para Priorização de Serviços de Manutenção em Equipamentos do Sistema de Distribuição de uma Concessionária de Energia Elétrica

Tema: Gestão Ativos e Manutenção

Autores: Fabrício Augusto de Souza – Copel DIS, Marcelo Favoretto Castoldi – UTFPR-CP, Alessandro Goedel – UTFPR-CP, Wesley Angelino de Souza – UTFPR-CP

Co-Autores: -

Empresa: Copel Distribuição S.A.

Resumo

A priorização dos serviços de manutenção nas redes de distribuição das concessionárias de energia elétrica é fundamental para garantir a melhoria na qualidade do fornecimento, visto que está diretamente ligada à minimização das falhas e interrupções em seus sistemas. Neste contexto, o principal desafio das concessionárias é aplicar de forma mais eficiente os recursos de manutenção em seus ativos, dada a complexidade do problema. Este trabalho propõe uma metodologia multicritério para atribuição de pesos em uma situação real, visando a priorização da manutenção em equipamentos no sistema de distribuição da Companhia Paranaense de Energia – Copel. A proposta parte da avaliação dos critérios do problema por especialistas, utilizando o método Processo Analítico Hierárquico (AHP - do inglês, *Analytic Hierarchy Process*), bem como a Técnica de Ordenação de Preferências por Similaridade com a Solução Ideal (TOPSIS - do inglês, *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) para a ordenação das alternativas, e a Análise Relacional Grey (GRA - do inglês, *Grey Relational Analysis*) para a avaliação dos rankings. Os resultados preliminares obtidos demonstraram que a atribuição dos pesos por meio da avaliação de especialistas impacta consideravelmente nos rankings de priorização e, consequentemente, nos indicadores de qualidade de fornecimento das distribuidoras.

1. Introdução

Os recentes avanços tecnológicos têm aumentado a necessidade e a demanda por eletricidade, tornando os consumidores cada vez mais dependentes de um fornecimento de energia elétrica ininterrupto. Como consequência, os clientes estão cada vez mais exigentes no que diz respeito a qualidade e continuidade do fornecimento de energia (ALAM, SHAHJALAL, ISLAM, HASAN, AHMED & JANG, 2020; ALOWAIFEER & ALMUHAINI, 2017).

Neste cenário, é importante observar que a maior parte das interrupções no Sistema Elétrico de Potência ocorre nas redes de distribuição de energia, sendo que mais de 70% das falhas e interrupções estão concentradas nas áreas de abrangência das concessionárias de distribuição (BILLINTON & ALLAN, 1996; COSTA, BESSANI & BATISTA, 2022; BROWN, 2009).

Diante disso, as concessionárias de distribuição de energia elétrica têm concentrado esforços na busca por alternativas para melhorar a qualidade e a agilidade no restabelecimento do fornecimento de energia. Para tal, uma das estratégias adotadas por essas empresas é a manutenção de seus ativos no sistema elétrico, prática que desempenha um papel fundamental na redução do número e da gravidade das falhas, além de mitigar prejuízos financeiros, maximizar os lucros e reduzir os impactos negativos na satisfação dos clientes em relação aos serviços prestados (COSTA, PEREIRA, MADRUGA, ARANDA & BARBOSA, 2023; FERNANDES, 2014).

Dada a importância do tema, a busca por formas de priorização de manutenção tem sido amplamente estudada por diversos autores. Sarache, Castrillón, González e Folleco (2009) demonstram a aplicabilidade de técnicas e modelos multicritério como uma metodologia eficaz para auxiliar na tomada de decisão relacionada à substituição de equipamentos em uma fábrica. Já Lima, Clemente e Almeida (2016), considerando o conceito de conformidade de energia, propuseram um modelo de priorização de locais para a instalação de reguladores de tensão, com base em critérios técnicos, regulatórios, econômicos e sociais. Alguns trabalhos apresentam limitações quanto ao escopo de implementação. Em seu artigo, Costa, Pereira, Madruga, Aranda e Barbosa (2023) propõem uma metodologia para priorizar quais alimentadores do sistema de distribuição de energia receberão investimentos financeiros. A proposta utiliza o Processo Analítico Hierárquico (AHP - do inglês, *Analytic Hierarchy Process*) para determinar quais serão selecionados como prioritários para receber os recursos disponíveis. No entanto, o estudo apresentado limita-se a um ranking com apenas 13 equipamentos/alimentadores.

Já os trabalhos, Nunes e Andrade (2019), Vier (2019), Mello (2017) e Monteiro, Silveira, Silva, Silva, Fischer e Pereira (2023), abordam o problema de priorização em diferentes escopos de implementação. Os dois primeiros focam em linhas de transmissão, enquanto os dois últimos concentram-se em subestações. Ainda, Jahani, Mohammadi, Pourdaryaei, Shayesteh e Karimi (2022) utilizam dados de sistemas modelados para apresentar os resultados de seu trabalho. Sua implementação limita-se a um sistema de teste de 14 barramentos do IEEE, e propõe uma técnica para resolver problemas estocásticos de tomada de decisão multicritério baseada em informações de pesos incertas.

Além disso, o problema de priorização de serviços de manutenção apresenta algumas complexidades e desafios, dentre os quais se destacam: i) o grande número de intercorrências de manutenção no sistema de distribuição, devido à sua malha e extensão; ii) a limitação de recursos destinados a essa atividade; iii) a grande diversidade de variáveis que influenciam na tomada de decisão sobre a aplicação eficaz dos recursos de manutenção e; iv) a necessidade constante de aumentar a eficiência na gestão e alocação de recursos.

Isto posto, é notória a complexidade do problema de priorização da manutenção preventiva, o que torna evidente a necessidade de abordagens mais avançadas para a tomada de decisões no setor elétrico. Assim, este artigo propõe a implementação de uma metodologia de priorização multicritério em um sistema real de uma concessionária de distribuição de energia elétrica, a Companhia Paranaense de Energia - Copel Distribuição, localizada na região sul do Brasil. A metodologia proposta emprega uma abordagem híbrida com a Técnica de Ordenação de Preferências por Similaridade com a Solução Ideal (TOPSIS - do inglês, *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) e o método Processo Analítico Hierárquico que, a partir das avaliações realizadas por especialistas e da agregação de pesos para os critérios, resulta em rankings de priorização da manutenção mais precisos. Além disso, a Análise Relacional Grey (GRA – do inglês, *Grey Relational Analysis*) é aplicada para avaliar os rankings obtidos.

A combinação das técnicas TOPSIS e AHP permite a utilização de uma quantidade maior de alternativas sem prejuízo ao resultado final da priorização, superando as limitações do método AHP quando aplicado isoladamente, o que justifica a abordagem híbrida adotada neste artigo. Ainda, a agregação dos pesos atribuídos a cada critério tem origem nos resultados das melhores avaliações de consistência no experi-

mento. Os resultados parciais obtidos indicam uma forte correlação entre as medições de consistência e a obtenção dos melhores rankings de ordenação. Desta forma, a pesquisa contribui para a continuidade dos estudos sobre rankings de priorização em análises multicritério.

Portanto, este artigo está organizado em seções e subseções, abrangendo: a introdução; os indicadores de continuidade do fornecimento de energia; a priorização multicritério; a metodologia adotada; os resultados obtidos no projeto; e as conclusões do trabalho.

2. Desenvolvimento

2.1. Indicadores de Continuidade do Fornecimento de Energia

Uma das principais formas utilizadas pelos órgãos reguladores e pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica para avaliar o desempenho do sistema elétrico e mensurar a qualidade dos serviços prestados é por meio da apuração de indicadores de continuidade do fornecimento de energia. No Brasil, esses índices são definidos e monitorados pela Agência Nacional de Energia Elétrica, órgão responsável pela regulamentação do setor (ANEEL, 2024).

Desta forma, os indicadores de continuidade são métricas que mensuram a frequência e a duração das interrupções do fornecimento de energia que afetam as unidades consumidoras do sistema de distribuição. Esses indicadores são comumente classificados em dois grupos: i) os indicadores individuais e ii) os indicadores coletivos, sendo apurados de forma mensal, trimestral e/ou anual.

Os índices coletivos são amplamente utilizados para avaliar o desempenho do sistema em uma dimensão mais representativa, fornecendo uma projeção da duração e frequência médias das interrupções de energia nas unidades consumidoras do sistema, sendo descritos e calculados conforme segue: o DEC refere-se à duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora. Já o FEC refere-se à frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos de interrupções. As equações (1) e (2) apresentam o cálculo para a apuração mensal desses índices (MOHAMMADI, MASHHADI & SHAHIDEHPOUR, 2019):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{NUC} DIC(i)}{NUC} \quad (1) \quad FEC = \frac{\sum_{i=1}^{NUC} FIC(i)}{NUC} \quad (2)$$

em que: i é o índice de unidades consumidoras atendidas em baixa tensão (BT) ou média tensão (MT) faturadas do conjunto de consumidores; NUC é o número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de estudo, atendidas em BT ou MT; $DIC(i)$ é a duração de interrupção individual por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora; e $FIC(i)$ é a frequência de interrupção individual por unidade consumidora, expressa em interrupções e centésimos de interrupções.

Portanto, dada a relevância dos indicadores de continuidade DEC e FEC, ambos foram definidos como critérios indispensáveis no problema multicritério estudado, conforme detalhado na seção Metodologia.

2.2. Priorização Multicritério

Estabelecer prioridades diante de uma série de alternativas não é uma tarefa fácil e exige um planejamento assertivo e responsável, especialmente no contexto de uma concessionária de distribuição, onde os critérios e alternativas podem ser numerosos e frequentemente interrelacionados. Sendo este um dos principais desafios do setor, torna-se evidente a necessidade de abordagens mais avançadas para a tomada de decisões relacionadas ao problema de priorização da manutenção preventiva no setor. Nesse cenário, a análise multicritério apresenta-se como uma solução promissora, permitindo uma alocação mais efi-

ciente de recursos e, consequente, a melhoria na qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias (LOPES, SENRA, NETO, COSTA, SOUSA, CABO & OLIVEIRA, 2017).

Em relação à qualidade dos serviços, o módulo 8 dos Procedimentos para Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) regulamenta os fatores de qualidade de energia, muitos dos quais estão diretamente relacionados à manutenção das redes de distribuição elétrica. A utilização de indicadores de qualidade de energia elétrica é essencial para o planejamento eficiente das atividades de manutenção. Conforme destacado por Penin (2000), a consideração desses critérios contribui de forma significativa para o planejamento de investimentos, abrangendo aspectos como duração e frequência de falhas, níveis de tensão, carregamento dos condutores, entre outros.

Ainda assim, o processo de manutenção do sistema elétrico de distribuição tem como principal objetivo selecionar os trechos ou ativos do sistema que necessitam de manutenção. Ou seja, determinar quais alimentadores, trechos ou equipamentos devem ser priorizados no direcionamento de recursos de inspeção e manutenção. Na maioria das vezes, esse procedimento, também chamado de priorização ou hierarquização, fundamenta-se em indicadores de desempenho, características e importância das redes, sendo os principais aspectos descritos a seguir (FERRET, 2012):

- Desempenho Operativo: refere-se à avaliação do desempenho do trecho ou alimentador, considerando os indicadores de continuidade do fornecimento de energia;
- Condições Mecânicas e Elétricas: consiste na avaliação do estado da rede ou ativo, incluindo a identificação de falhas, defeitos ou situações potenciais;
- Importância da Rede: refere-se à atribuição de maior importância ou prioridade aos ativos mais relevantes, considerando características como o número de consumidores atendidos, o tipo de linha, entre outros fatores.

Desta forma, os critérios definidos no problema estudado neste artigo, descritos na seção de Metodologia, abrangem os aspectos apresentados, proporcionando maior robustez e assertividade às priorizações realizadas por meio de uma lista ordenada de alternativas, conforme o método proposto.

2.3. Metodologia

O método desenvolvido neste estudo realiza o mapeamento dos ativos da rede de distribuição que se encontram fora de operação, com o objetivo de priorizar seu retorno mais rápido possível, considerando aqueles mais relevantes para o sistema. A relevância é estabelecida com base nos potenciais ganhos proporcionados, alinhados à estratégia da companhia, sendo esses os primeiros a receber os recursos de manutenção. A priorização é determinada por meio de um ranking que organiza os equipamentos em ordem de importância para a operação, incluindo religadores automáticos, chaves de proteção e de manobra, estrategicamente distribuídos no sistema.

O trabalho foi desenvolvido em 23 de março de 2024, fundamentado em dados reais de equipamentos fora de operação pertencentes a uma concessionária de distribuição de energia elétrica, a Copel Distribuição. O problema foi modelado utilizando o método AHP, que permite a decomposição do problema em uma hierarquia de critérios, subcritérios e alternativas, viabilizando uma análise estruturada e sistemática baseada na experiência de especialistas da concessionária. A estrutura do problema é apresentada na Figura 1, na qual o Objetivo Geral, representado no Nível 1 da hierarquia, consiste na priorização dos equipamentos fora de operação, enquanto no Nível 2, estão dispostos os Critérios e Subcritérios considerados no estudo.

Hierarquia do Problema

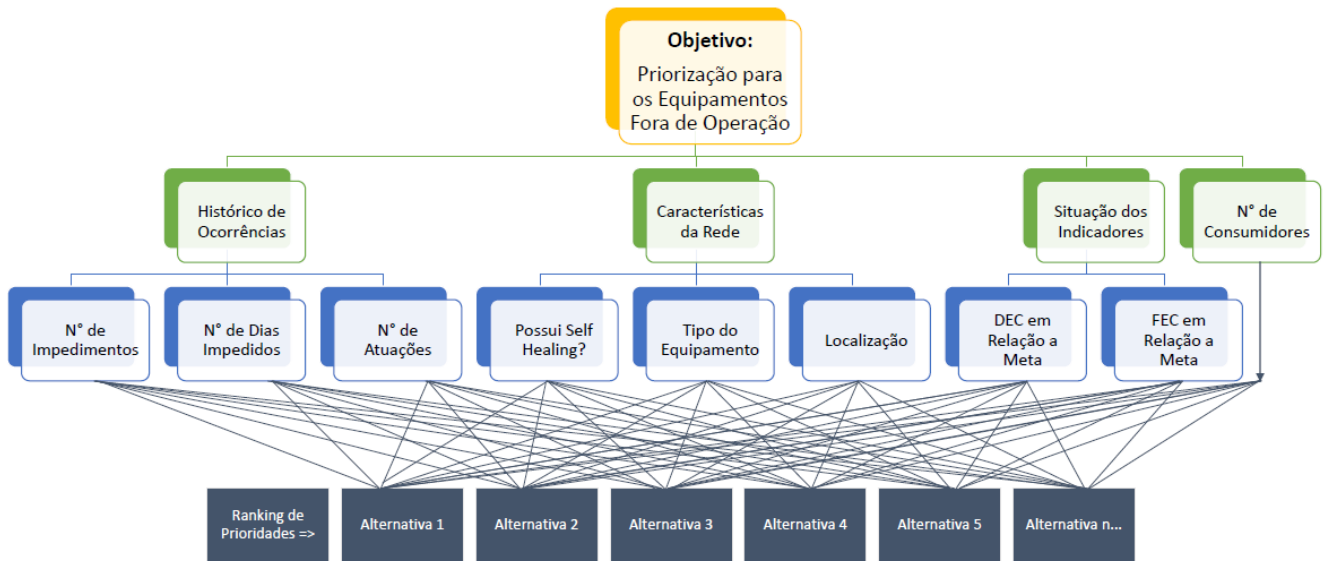


Figura 1: Hierarquia do Problema Proposto

Dessa maneira, os critérios e subcritérios que compõem o problema são descritos a seguir:

- Histórico de ocorrências (C1): consiste no resultado de três indicadores considerados relevantes para análise do problema, em um horizonte de três anos:
 - Número de impedimentos (C1.1): consiste na frequência que, ao longo deste período, o equipamento permaneceu inoperante;
 - Número de dias impedidos (C1.2): representa a soma de dias que o referido equipamento permaneceu fora de operação durante o período;
 - Número de atuações (C1.3): indica a frequência em que o Centro de Operações utilizou este equipamento para manobrar o sistema (ações de abertura e/ou fechamento), considerando o histórico.
- Características da rede (C2): referem-se aos principais atributos da rede de distribuição que exercem maior influência nos resultados do modelo:
 - Possui Self Healing? (C2.1): corresponde à informação sobre se o equipamento pertence a um sistema de reconfiguração automática. Esse tipo de sistema é capaz de detectar e isolar falhas automaticamente, sem intervenção humana. Para isso, é essencial que o equipamento esteja em plenas condições de funcionamento, destacando, neste caso, a importância da priorização;
 - Tipo de equipamento (C2.2): refere-se às características operacionais do equipamento, as quais refletem sua representatividade no sistema;
 - Localização (C2.3): consiste no perímetro geográfico em que o equipamento se encontra, podendo ser urbano ou rural.
- Situação dos indicadores (C3): indica a condição dos indicadores de continuidade do fornecimento de energia no conjunto elétrico da ANEEL onde o equipamento se encontra. Dessa forma, equipamentos situados em conjuntos cujos indicadores estão fora das metas estabelecidas possuem maior grau de importância na priorização:

DEC em relação a meta (C3.1): representa a situação do indicador DEC, considerando seu resultado em uma janela móvel de 12 meses em comparação com a meta no conjunto elétrico onde o equipamento se encontra;

- FEC em relação a meta (C3.2): Idem ao item anterior, no entanto considerando o indicador FEC;
- Número de consumidores (C4): representa o número de clientes que o equipamento secciona quando manobrado.

Adicionalmente, a proposta adota uma abordagem híbrida com o método TOPSIS, que, por meio dos pesos definidos, resulta em rankings de priorização da manutenção mais precisos. Além disso, a Análise Relacional Grey é aplicada para avaliar os rankings obtidos. Esses métodos são descritos nas próximas seções.

2.3.1. Método AHP

O método AHP possibilita uma análise estruturada de um problema de múltiplos critérios, por meio da construção de uma hierarquia de critérios, subcritérios e alternativas. Dessa forma, as preferências subjetivas e os objetivos dos tomadores de decisão são quantificados e ponderados, considerando comparações par a par entre os critérios e subcritérios, permitindo a priorização das alternativas de maneira mais adequada (BRIOZO & MUSETTI, 2015).

Adicionalmente, Ishizaka e Nemery (2013) sugerem que o método AHP pode ser descrito em quatro etapas, como segue:

- Estruturação do problema: o problema é estruturado de forma hierárquica, definindo o objetivo geral, os critérios, subcritérios e as alternativas;
- Cálculo de prioridades: o decisor compara os critérios de forma paritária, utilizando as equações (3) e (4) e observando a escala fundamental de Saaty, apresentada na Tabela 1;
- Verificação de inconsistência: verifica-se a consistência das comparações realizadas durante a análise;
- Análise de sensibilidade: avalia-se o impacto de mudanças nos valores dos pesos dos critérios nas decisões.

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} C1 & C2 & C3 & C4 & \dots & Cn \end{matrix} \\ \begin{matrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \\ \vdots \\ Cn \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & a_{24} & \dots & a_{2n} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & a_{34} & \dots & a_{3n} \\ \frac{1}{a_{14}} & \frac{1}{a_{24}} & \frac{1}{a_{34}} & 1 & \dots & a_{4n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \frac{1}{a_{3n}} & \frac{1}{a_{4n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

$$w_i = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} \quad (4)$$

onde:

a_{ij} são os elementos da matriz M que representam a avaliação do decisor, critério i (C_i) em relação ao critério j (C_j);

$1/a_{ij}$ é o inverso do valor do elemento a_{ij} , sendo que a_{ij} é igual a 1 para todo $i = j$;
 w_i representa o autovetor ponderado para a alternativa i ;
 n é o número total de alternativas.

Tabela 1: Escala Fundamental de Saaty

| Intensidade | Definição |
|-------------|--|
| 1 | As duas alternativas têm a mesma importância; |
| 3 | A experiência e o julgamento do decisor é ligeiramente favorável a uma alternativa; |
| 5 | A experiência e o julgamento do decisor é fortemente favorável a uma alternativa; |
| 7 | É demonstrado na prática que uma alternativa é muito mais importante do que a outra; |
| 9 | Uma alternativa é extremamente mais importante do que a outra; |
| 2, 4, 6, 8 | Valores usados para quantificar julgamentos intermediários a esses. |

No contexto do estudo, a Figura 2 mostra como se desenvolve o procedimento metodológico, desde a análise do problema até a obtenção dos pesos aplicados ao método multicritério. O procedimento é estruturado com base na utilização parcial do método AHP, ou seja, até a obtenção dos pesos desejados, que serão utilizados como dados de entrada no método TOPSIS.

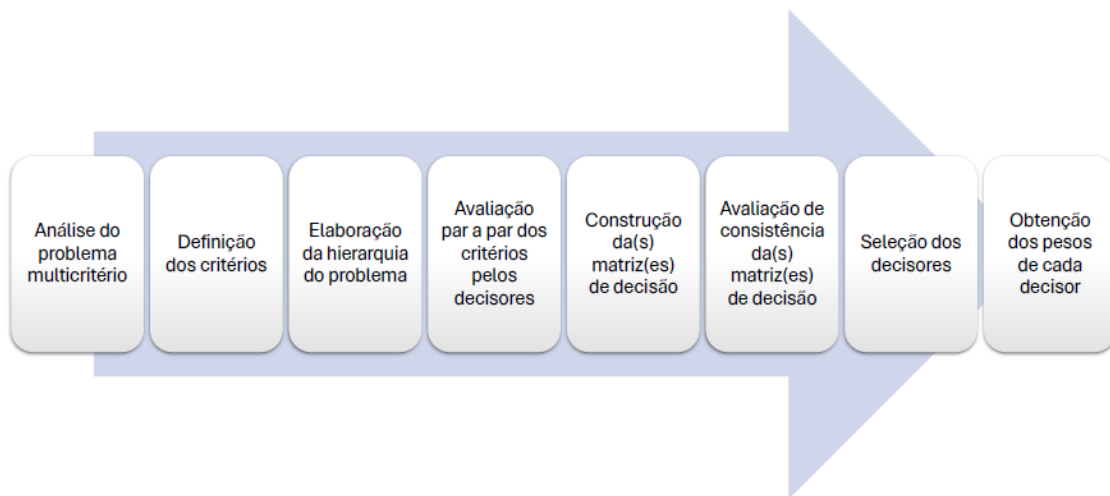


Figura 2: Passos da Metodologia

2.3.2. Método TOPSIS

O método TOPSIS fundamenta-se nos conceitos de 'solução ideal positiva' e 'solução ideal negativa' para a avaliação e seleção das melhores alternativas em um conjunto de opções com critérios previamente definidos. Para cada critério, são calculadas as distâncias entre cada alternativa e a solução ideal positiva, bem como entre cada alternativa e a solução ideal negativa. Assim, as alternativas são classificadas com base nessas distâncias, sendo que a solução ideal positiva corresponde àquela que oferece os maiores benefícios entre todas as alternativas disponíveis, enquanto a solução ideal negativa está associada àquela que apresenta as menores vantagens (TRIVEDI, SHAH, EP, ABUALIGAH & KALITA, 2024).

De acordo com Thakkar (2021), o método pode ser dividido em 7 etapas:

- Construção da matriz de decisão: consiste em organizar os dados em uma matriz, onde cada coluna corresponde a um critério e cada linha a uma alternativa;

- Normalização da matriz de decisão: ajusta os valores para torná-los comparáveis entre si;
- Cálculo da matriz normalizada e ponderada: os valores normalizados são multiplicados pelos respectivos pesos dos critérios;
- Obtenção da solução ideal positiva e a negativa: identifica os valores máximos e mínimos para cada critério;
- Cálculo das distâncias euclidianas: determina a proximidade de cada alternativa em relação às soluções ideais;
- Cálculo da proximidade da solução ideal: avalia a relação entre a distância de uma alternativa à solução ideal positiva e à negativa;
- Ordenação decrescente das alternativas: as alternativas são classificadas com base na proximidade da solução ideal positiva.

Isto posto, as principais equações do método são aquelas que definem as distâncias euclidianas da amostra em relação à solução ideal positiva e à solução ideal negativa, descritas nas equações (5) e (6), além da equação (7), que define o coeficiente de proximidade relativa à solução ideal para cada alternativa:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^+ - v_{ij})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^- - v_{ij})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

$$\xi_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (7)$$

onde:

d_i^+ é a distância euclidiana de cada alternativa v_{ij} em relação a solução ideal positiva v_j^+ ;

d_i^- é a distância euclidiana de cada alternativa v_{ij} em relação a solução ideal negativa v_j^- ;

ξ_i é o coeficiente de proximidade relativa de cada alternativa.

2.3.3. Análise Grey

O método de Análise Relacional Grey baseia-se na observação do grau de similaridade entre as curvas geométricas das sequências de dados disponíveis, comparando a proximidade de suas relações. Assim, quanto mais semelhantes forem as curvas, mais próxima será a relação entre as sequências (LIU, YANG & FORREST, 2023).

Nessa metodologia, o Grau Relacional Grey (GRG – do inglês *Grey Relational Grade*) reflete os níveis dos parâmetros de controle associados às melhores características de desempenho e pode ser utilizado para a avaliação de problemas de ordenação, mensurando como determinado método classificou um conjunto de alternativas (PRADHAN, 2013; ABDALLAH, ALI & PERVAIZ, 2023).

Dessa forma, neste estudo, o método de Análise Relacional Grey é utilizado para a avaliação dos rankings de ordenação obtidos pela metodologia híbrida AHP e TOPSIS, sendo descrito em quatro etapas (ABDALLAH, ALI & PERVAIZ, 2023):

- Normalização dos dados: assegura que todas as variáveis sejam ajustadas para a mesma escala ou ordem de grandeza;

- Obtenção da sequência de desvios: consiste em calcular os desvios, ou diferenças relativas, entre cada alternativa e a referência ideal;
- Cálculo do Coeficiente Relacional Grey (GRC): nesta etapa, são determinados os coeficientes que refletem a relação entre as alternativas, utilizando a equação (8);
- Cálculo da Nota Relacional Grey (GRG): obtém-se uma nota para cada alternativa, refletindo sua proximidade com a solução ideal, por meio da equação (9), permitindo a ordenação final da lista de dados.

$$\xi(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi_s \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi_s \cdot \Delta_{\max}} \quad (8)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n w_k \xi_i(k) \quad (9)$$

onde:

$\xi(k)$ é valor do Coeficiente Relacional Grey na iteração k ;

Δ_{\min} é a diferença mínima entre as sequências de dados;

Δ_{\max} é a diferença máxima entre as sequências de dados;

ξ_s é o coeficiente de distinção, parâmetro que indica a influência entre Δ_{\min} e Δ_{\max} , normalmente denotado com o valor de 0,5;

γ é o Grau Relacional Grey;

n é o número total de elementos;

w_k é o peso do elemento i ;

$\xi_i(k)$ é o valor do elemento i .

2.4. Resultados

O estudo de caso foi realizado utilizando dados do sistema de distribuição da Companhia Paranaense de Energia. Inicialmente, especialistas mapearam os critérios a serem utilizados, identificando aqueles mais relevantes para o processo de análise. Com o auxílio de um questionário, foi possível mensurar a importância desses critérios na priorização de manutenções e/ou ações de operação nos equipamentos inoperantes do sistema. Essa avaliação foi realizada de forma paritária, ou seja, comparando os critérios dois a dois, utilizando a Escala Fundamental de Saaty, que atribui pesos aos critérios com base em seu grau de importância relativo, em uma escala de 1 a 9, conforme apresentado na Tabela 1.

A pesquisa contou com a participação de 31 especialistas das áreas de manutenção e operação, abrangendo toda a concessão da companhia. Esses profissionais foram agrupados em categorias conforme sua experiência e distribuídos da seguinte forma: i) até 2 anos; ii) de 2 a 5 anos; iii) de 6 a 10 anos; iv) de 11 a 20 anos e; v) acima de 20 anos de experiência. A Figura 3 apresenta o histograma dessa distribuição, evidenciando que a maioria dos entrevistados possui ampla experiência nas áreas de manutenção e operação, contexto abordado no estudo.

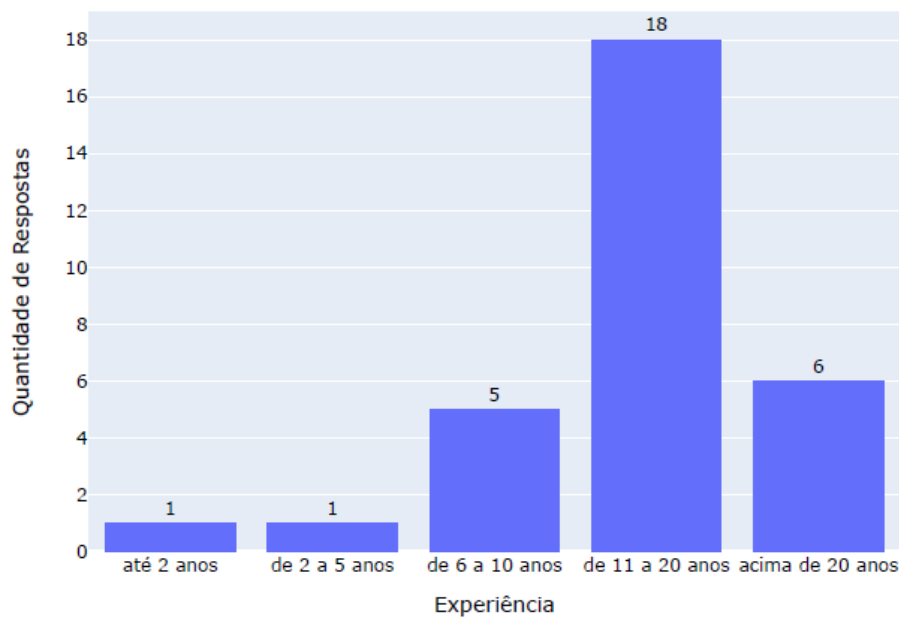


Figura 3: Histograma das Respostas dos Decisores por Tempo de Experiência

Como resultado da avaliação dos critérios/subcritérios por meio da aplicação do método AHP, obtém-se os valores dos pesos, cuja distribuição é apresentada nos gráficos de boxplot da Figura 4. A análise desses gráficos permite identificar a presença de outliers e a avaliar a concentração dos valores em torno da mediana, que corresponde à linha central dentro de cada quadrilátero nos gráficos. O eixo y indica o valor do peso referente a cada ponto, enquanto as cores dos pontos representam a experiência do decisor, conforme a legenda. Já a altura do quadrilátero corresponde à amplitude interquartil, que compreende 50% dos dados centrais do conjunto. As hastes, que são as linhas inferior e superior que se estendem a partir dos limites das caixas, indicam os valores mínimos e máximos, sendo os valores fora desses limites considerados outliers.

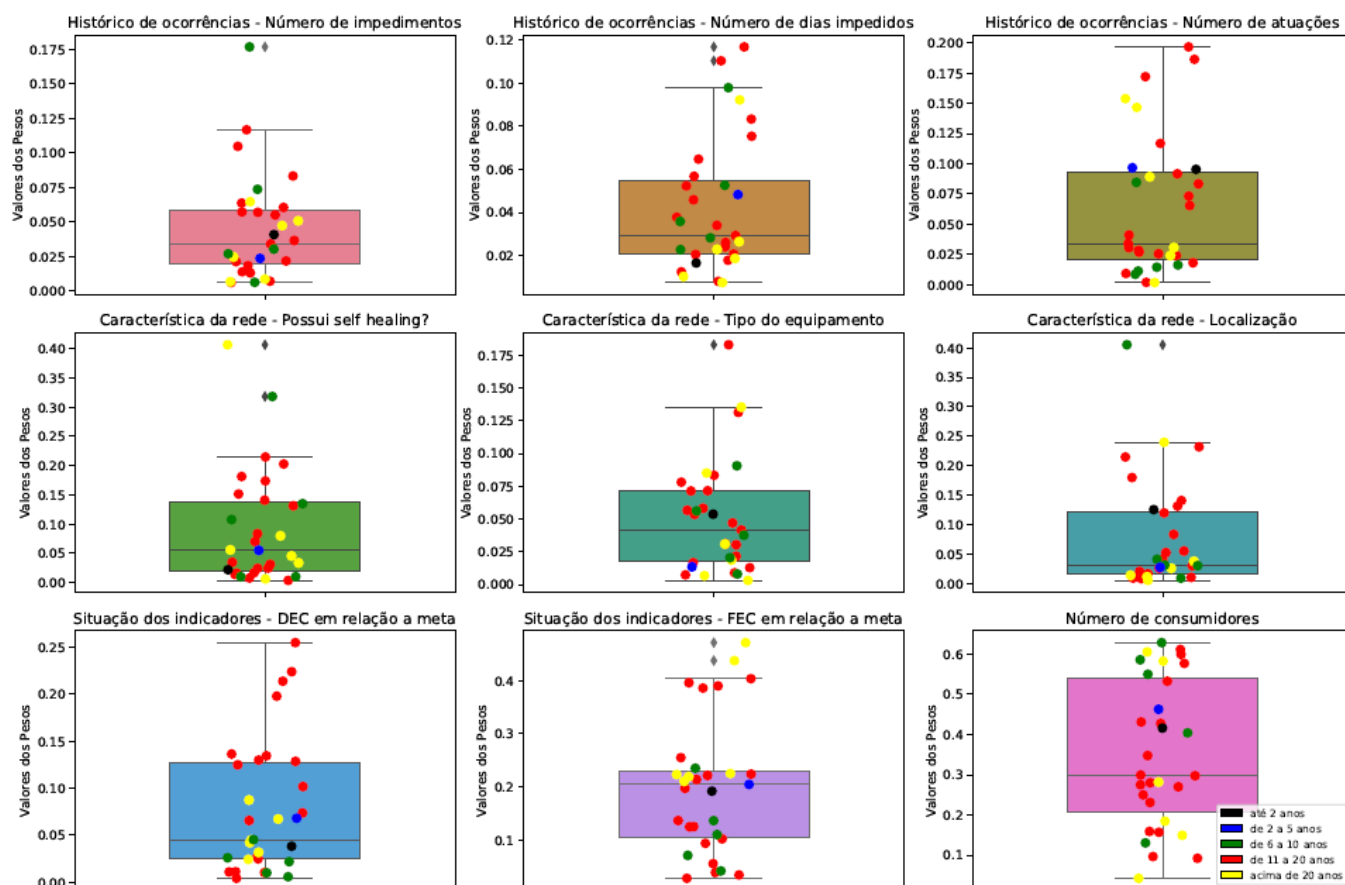


Figura 4: Boxplot dos Pesos Atribuídos pelos Decisores

Assim, a análise dos pesos, em conjunto com a verificação das inconsistências nas avaliações por meio do cálculo da Razão de Consistência, possibilita avaliar a coerência dos pesos obtidos e identificar as avaliações mais consistentes. Dessa forma, é possível determinar quais respostas (pesos) apresentam maior confiabilidade, segundo o método AHP. A Tabela 2 apresenta os valores dos pesos calculados para cada critério, destacando os seis melhores índices de Razão de Consistência, conforme a análise dos decisores. Cada linha da tabela exibe os valores atribuídos por um decisor, enquanto as colunas representam os critérios e subcritérios avaliados, de acordo com a notação descrita no tópico 2.3 da Metodologia.

Tabela 2: Valores dos Pesos das Melhores Avaliações

| Resp. | C1.1 | C1.2 | C1.3 | C2.1 | C2.2 | C2.3 | C3.1 | C3.2 | C4 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0,0605 | 0,0293 | 0,1966 | 0,0035 | 0,0303 | 0,0081 | 0,1287 | 0,3860 | 0,1570 |
| 8 | 0,0236 | 0,0483 | 0,0967 | 0,0550 | 0,0134 | 0,0275 | 0,0681 | 0,2044 | 0,4630 |
| 16 | 0,0474 | 0,0229 | 0,1538 | 0,0454 | 0,0068 | 0,0140 | 0,0875 | 0,4377 | 0,1846 |
| 20 | 0,0241 | 0,0241 | 0,0241 | 0,0310 | 0,0310 | 0,0103 | 0,2139 | 0,2139 | 0,4277 |
| 24 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,1250 | 0,1250 | 0,2500 |
| 26 | 0,0340 | 0,0340 | 0,0340 | 0,0701 | 0,0216 | 0,0104 | 0,2240 | 0,2240 | 0,3479 |

Após a elaboração dos rankings por meio da técnica TOPSIS, a etapa seguinte consiste em sua avaliação utilizando o método de Análise Relacional Grey para calcular o Grau Relacional Grey (GRG) em cada amostra do ranking. Esse cálculo reflete a pontuação de cada amostra em relação à sua posição na série de dados. Para a validação do estudo, foram consideradas as 150 primeiras posições do ranking ordenado pelo método TOPSIS. A Figura 5 apresenta o gráfico de dispersão com os valores de GRG obtidos no

experimento, onde o eixo x representa a posição das amostras (de 0 a 149) e o eixo y corresponde aos valores de GRG para cada ponto. Além disso, para validar a tendência de ordenação do ranking, o gráfico inclui a reta de regressão linear calculada para as amostras analisadas.

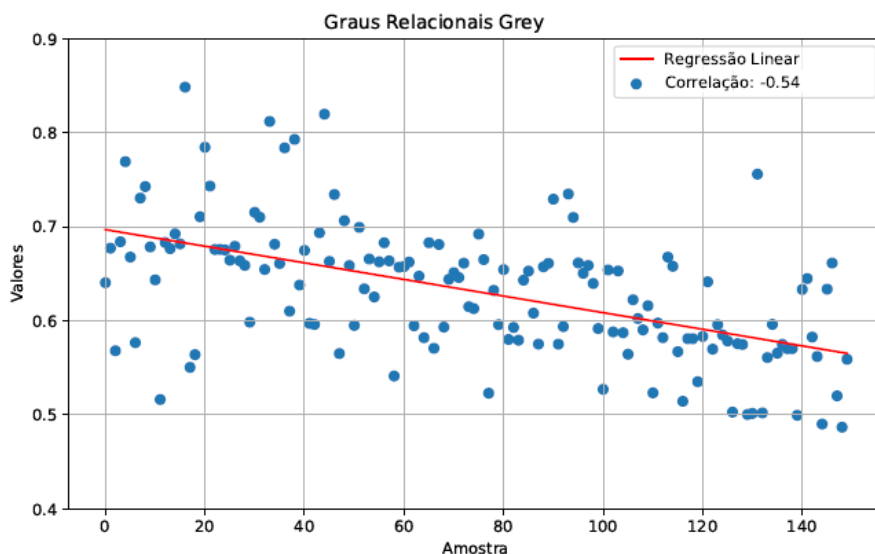


Figura 5: Gráfico de Dispersão do Grau Relacional Grey com Regressão Linear

Em análise, observa-se a dispersão dos valores do GRG ao longo das amostras e a tendência de convergência, evidenciada pelo declínio da reta de regressão linear, indicando que os dados apresentam um ordenamento: quanto mais próximas as amostras estão das primeiras posições da lista, maiores tendem a ser os valores do GRG; à medida que as posições aumentam, os valores do GRG diminuem na maioria dos casos. Adicionalmente, corroborando a tendência observada, foi calculado o coeficiente de correlação das amostras, cujo valor é -0,54, conforme indicado na legenda do gráfico. O coeficiente de correlação, uma métrica que varia de -1 a 1, indica que, quanto mais próximo de 1, maior a tendência das variáveis analisadas crescerem juntas; em contrapartida, valores próximos de -1 sugerem que, à medida que uma variável aumenta, a outra tende a diminuir. Assim, o resultado obtido, que aponta uma correlação moderada negativa, demonstra um declínio consistente nos valores do GRG conforme as posições das amostras aumentam no ranking, alinhando-se ao princípio do Método de Análise Grey.

Por fim, a proposta busca contribuir para a área de análise multicritério, apresentando uma metodologia prática e eficaz para a tomada de decisões em contextos complexos. A próxima seção apresenta as conclusões sobre os resultados obtidos neste estudo.

3. Conclusão

Este trabalho apresenta uma metodologia alternativa para auxiliar na solução de problemas de tomada de decisão com múltiplos critérios. A abordagem proposta consiste em uma técnica híbrida que combina a aplicação de pelo menos três métodos: AHP, TOPSIS e Análise Relacional Grey. O método se destaca por integrar vários critérios e seus respectivos pesos, com base nas melhores avaliações dos decisores, reduzindo a subjetividade e minimizando qualquer tipo de viés não racional dos tomadores de decisão, o que resulta em julgamentos mais confiáveis e precisos.

Os resultados preliminares desta pesquisa trazem avanços e demonstram uma forte correlação entre as avaliações com melhores razões de consistência e os melhores rankings. A utilização de métricas estatís-

ticas, como regressão linear e correlação, reforça a robustez dos resultados. Dessa forma, a metodologia proposta representa um progresso na resolução desta questão de grande importância para o setor empresarial, especialmente para as concessionárias de energia elétrica, possibilitando uma gestão mais eficiente dos recursos e maior confiabilidade na operação dos sistemas de distribuição de energia.

Enfim, fica evidente que o tema abordado é de significativa relevância, pois a capacidade de tomar decisões eficientes e eficazes em situações complexas é fundamental em diversos contextos, especialmente quando se trata da priorização de manutenção em uma concessionária de distribuição de energia elétrica.

4. Referências bibliográficas

- ALAM, M. M.; SHAHJALAL, M.; ISLAM, M. M.; HASAN, M. K.; AHMED, M. F.; JANG, Y. M. Power flow management with demand response profiles based on user-defined area, load, and phase classification. *IEEE Access*, v. 8, p. 218813–218827, 2020.
- ALOWAIFEER, M.; ALMUHAINI, M. Load priority modeling for smart service restoration. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, v. 40, n. 3, p. 217–228, 2017.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. Reliability Evaluation of Power Systems. 2nd. ed. New York: Plenum Press, 1996.
- COSTA, M. M.; BESSANI, M.; BATISTA, L. S. A multiobjective and multicriteria approach for optimal placement of protective devices and switches in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 37, n. 4, p. 2978–2985, 2022.
- BROWN, R. Electric Power Distribution Reliability. 2nd. ed. New York: Marcel Dekker, 2009.
- COSTA, R. D. S.; PEREIRA, P. R. D. S.; MADRUGA, E. P.; ARANDA, J. A. S.; BARBOSA, J. L. V. A hybrid model for investment prioritization and performance analysis in electrical power distribution systems. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 34, n. 2, p. 420–428, 2023.
- FERNANDES, L. Ferramenta de apoio à decisão para priorização de obras de manutenção em redes de distribuição de energia elétrica. 59 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, 2014.
- SARACHE, W.; CASTRILLÓN, O.; GONZÁLEZ, G.; FOLLECO, A. A multi-criteria application for an equipment replacement decision. *Ingeniería y desarrollo: revista de la División de Ingeniería de la Universidad del Norte*, v. 25, p. 80–98, jun. 2009.
- LIMA, M. A. X. de; CLEMENTE, T. R. N.; ALMEIDA, A. T. de. Prioritization for allocation of voltage regulators in electricity distribution systems by using a multicriteria approach based on additive-veto model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 77, p. 1–8, 2016.
- NUNES, A.; ANDRADE, J. Use of failure data and criticality analysis in a maintenance management tool for electric power distribution company. *DYNA*, v. 86, p. 199–205, 03 2019.
- VIER, G. B. Manutenção de linhas de transmissão: metodologia multicritério para priorização da correção de defeitos em linhas de transmissão. 68 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Elétrica, São Leopoldo, RS, 2019.
- MELLO, G. D. d. Metodologia De Priorização De Investimentos Em Modernização De Equipamentos De Proteção E Manobra De Subestações De Distribuição. 2017.
- MONTEIRO, M.; SILVEIRA, M. S.; SILVA, P.; SILVA, A.; FISCHER, M.; PEREIRA, P. Multi-criteria methodology to prioritize the replacement and maintenance of power transformers. 2023. 7 p.
- JAHANI, F.; MOHAMMADI, M.; POURDARYAEI, A.; SHAYESTEH, E.; KARIMI, M. A Novel Multi-Criteria Decision-Making Framework in Electrical Utilities Based on Gray Number Approach. *IEEE Access*, v. 10, p. 121508–121519, 2022.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2024. <https://www2.aneel.gov.br>.

MOHAMMADI, R.; MASHHADI, H. R.; SHAHIDEHPOUR, M. Market-Based Customer Reliability Provision in Distribution Systems Based on Game Theory: A Bi-Level Optimization Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 10, n. 4, p. 3840-3848, jul. 2019. Doi: 10.1109/TSG.2018.2839598.

LOPES, I. S.; SENRA, P.; NETO, B.; COSTA, R.; SOUSA, M.; CABO, T.; OLIVEIRA, J. A. Multi-criteria classification for prioritization of preventive maintenance tasks to support maintenance scheduling. In: 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). [S. l.]: IEEE, 2017. p. 2102-2106.

PENIN, C. A. d. S. Análise de Índices de Qualidade no Planejamento Agregado de Investimentos em Ambientes de Incertezas. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FERRET, R. Hierarquização de Alimentadores para Fins de Manutenção Utilizando Análise Multicriterial. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2012.

BRIOZO, R. A.; MUSETTI, M. A. Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma unidade de pronto atendimento - upa 24 h. *Gestão & Produção*, Universidade Federal de São Carlos, v. 22, n. 4, p. 805-819, Oct 2015. ISSN 0104-530X.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. Multi-criteria Decision Analysis: Methods and Software. [S.l.: s.n.], 2013. 1-296 p.

TRIVEDI, P.; SHAH, J.; EP, R.; ABUALIGAH, L.; KALITA, K. A Hybrid Best-Worst Method (BWM) –Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) Approach for Prioritizing Road Safety Improvements. *IEEE Access*, v. 12, p. 30054-30065, fev. 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3368395.

THAKKAR, J. Multi-Criteria Decision Making. Springer Singapore, Imprint: Springer, 2021. ISBN 9789813347465.

LIU, S.; YANG, Y.; FORREST, J. GREY SYSTEMS ANALYSIS: Methods, Models and Applications. Singapore: Springer, 2023. ISBN 978-981-19615-9-5.

PRADHAN, D. M. Estimating the effect of process parameters on mrr, twr and radial overcut of edmed aisi d2 tool steel by rsm and gra coupled with pca. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 68, 09 2013.

ABDALLAH, S.; ALI, S.; PERVAIZ, S. Performance optimization of 3D printed polyamide 12 via multi jet fusion: A taguchi grey relational analysis (TGRA). *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, v. 6, n. 1, p. 72–81, 2023. ISSN 2588-8404.