

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO – UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

LINCOLN NAGAKI

**PRIORIZAÇÃO DOS ITENS SUJEITOS À MANUTENÇÃO
PREVENTIVA EM UM EQUIPAMENTO DO SISTEMA
ELÉTRICO DE POTÊNCIA POR MEIO DA ANÁLISE
RELACIONAL GREY**

**São Paulo
2019**

LINCOLN NAGAKI

**PRIORIZAÇÃO DOS ITENS SUJEITOS À MANUTENÇÃO PREVENTIVA
EM UM EQUIPAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA POR MEIO DA
ANÁLISE RELACIONAL GREY**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade
Nove de Julho - UNINOVE, como requisito
parcial para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia de Produção.

**Orientador: Prof. Dr. André Felipe
Henriques Librantz**

São Paulo
2019

Nagaki, Lincoln.

Priorização dos itens sujeitos à manutenção preventiva em um equipamento do sistema elétrico de potência por meio da Análise Relacional Grey. / Lincoln Nagaki. 2019.

85 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2019.

Orientador (a): Prof. Dr. André Felipe Henriques Librantz.

1. Confiabilidade. 2. Disjuntor. 3. Tração elétrica. 4. Manutenção.
 5. FMEA. 6. Análise Relacional Grey.
- I. Librantz, André Felipe Henriques. II. Titulo

CDU 658.5

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

DE

Lincoln Nagaki

Título da Dissertação: Priorização dos Itens Sujeitos à Manutenção Preventiva em um Equipamento do Sistema Elétrico de Potência por meio da Análise Relacional Grey

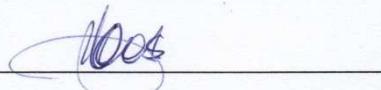
A Comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o(a) candidato(a) Lincoln Nagaki Aprovado.

São Paulo, 06 de agosto de 2019.

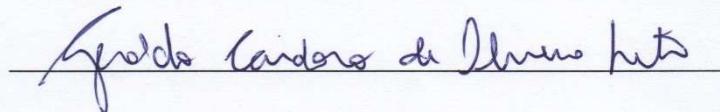
Prof(a). Dr(a).André Felipe Henriques Librantz (UNINOVE / PPGEP) - Orientador



Prof(a). Dr(a).Ivanir Costa (UNINOVE / PPGI) – Membro Externo



Prof(a). Dr(a).Geraldo Cardoso de Oliveira Neto (UNINOVE / PPGEP) - Membro Interno



Dedico este trabalho a todas as pessoas que direta ou indiretamente me apoiaram, à minha família, em especial à minha pequena Isabella Ayumi, que nasceu durante o desenvolvimento deste trabalho, propiciando uma grande alegria em minha vida, assim como para a minha filha mais velha, Laís Cristina, que conseguiu concluir seu mestrado antes de seu pai, servindo até como um incentivo para a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos ao meu orientador pelo incentivo e paciência que certamente contribuíram para o meu aprendizado. A minha família pelos momentos que estive ausente para a elaboração deste estudo e, finalmente, aos membros da banca pelo pronto atendimento ao convite e aos meus gestores, pelo incentivo e apoio na conclusão deste mestrado.

RESUMO

Este estudo foi idealizado visando melhorar os índices de ocorrência envolvendo os sistemas elétricos de transporte de passageiros sobre trilhos. Muitas destas ocorrências acabam paralisando parcialmente o sistema, gerando grande transtorno a quem depende deste tipo de modal para se locomover. Realizando-se um levantamento das falhas ocorridas por um período de aproximadamente três anos nas subestações de energia do sistema em estudo, foi verificado que o maior número de falhas apontava para os disjuntores de alta tensão que na sua grande maioria se tratava de vazamentos de gás esporádicos. Alguns equipamentos utilizam cápsulas de vácuo para este propósito, mas que são limitados para algumas aplicações em potências elevadas. Como estes tipos de ocorrências dependem pouco das equipes de manutenção para a prevenção e correção, além de na maioria das vezes não influenciar no sistema operacional devido sua dualidade de equipamentos, foi escolhido o segundo sistema que mais apresentou falhas neste período, que são os disjuntores alimentadores de tração elétrica (*feeders*), responsáveis pela proteção e seccionamento dos circuitos elétricos de forma segura sempre que necessário. Com dados obtidos por profissionais do setor foi verificado o equipamento mais crítico em relação ao número de falhas apresentado. Em outra consulta foi levantada a planilha de percepção de risco, obtendo-se o *Risk Priority Number*, vindo a compará-lo com os resultados obtidos ao aplicar a Análise Relacional Grey, inserindo alguns pesos nos índices de ocorrência, detecção e severidade sugeridos por alguns autores, onde foi novamente analisado para a verificação e validação dos resultados obtidos, apresentando um parecer dos profissionais da área para atestar os resultados. Analisando-se os resultados obtidos pela Análise Relacional Grey foi verificado que esta teoria apresentou dados coerentes com a realidade, se assemelhando aos obtidos pela Análise de Modos de Falhas e Efeitos tradicional, proporcionando um ajuste mais fino para o planejamento da manutenção, visto a possibilidade de inserir as devidas proporções dos índices em sua entrada.

- **Palavras-chave:** Confiabilidade, disjuntor, tração elétrica, manutenção, FMEA, Análise Relacional Grey.

ABSTRACT

This study was designed to improve the occurrence rates involving electric passenger transport systems on rails. Many of these occurrences end up partially paralyzing the system, causing great inconvenience to those who depend on this type of modal to get around. Conducting a survey of the failures that occurred for a period of approximately three years in the power substations of the system under study, it was found that the largest number of failures pointed to the high voltage circuit breakers that were mostly sporadic gas leaks. Some devices use vacuum caps for this purpose, but are limited for some high power applications. As these types of occurrences depend little on maintenance teams for prevention and correction, and most of the times do not influence the operating system due to its duality of equipment, it was chosen the second system that presented the most failures in this period, which are the feeder circuit breakers (feeders), which are responsible for the protection and safe isolation of electrical circuits whenever necessary. With data obtained by industry professionals, the most critical equipment in relation to the number of failures presented was verified. In another consultation, the risk perception spreadsheet was obtained, obtaining the Risk Priority Number, comparing it with the results obtained by applying the Gray Relational Analysis, inserting some weights in the occurrence, detection and severity indices suggested by some authors, where it was again analyzed for verification and validation of the obtained results, presenting an opinion of the professionals of the area to attest the results. Analyzing the results obtained by the Gray Relational Analysis it was found that this theory presented data consistent with reality, resembling those obtained by the traditional Failure Mode and Effects Analysis, providing a finer adjustment for maintenance planning, given the possibility insert the appropriate proportions of the indices in its entry.

Key words: Reliability, circuit breaker, electric traction, maintenance, female, Grey theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Subestação de Energia	21
Figura 2 - Esquema elétrico de alimentação da rede de tração elétrica entre duas subestações.....	23
Figura 3 - Curva da banheira	25
Figura 4 - Aplicação da Análise Relacional Grey	36
Figura 5 - Ordem cronológica	46
Figura 6- Índice de Falhas	50
Figura 7 – Comparativo RPN x Roos e Rosa (1/3 para cada índice).....	65
Figura 8 – Comparativo RPN x Chang.....	68
Figura 9 - Comparativo RPN x Leal <i>et al.</i> (2006)	71
Figura 10 – Comparativo Geral.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percepção de risco de ocorrência da falha.....	31
Tabela 2 - Percepção de risco de detecção da falha	32
Tabela 3 - Percepção de risco de severidade dos efeitos da falha.....	32
Tabela 4 - Distribuição de falhas nos sistemas.....	49
Tabela 5 – Pesquisa de Percepção de Risco	51
Tabela 6 - FMEA Disjuntor Alstom JRM – Função.....	52
Tabela 7 - FMEA Disjuntor Alstom JRM - Modo de Falha	53
Tabela 8 - FMEA Disjuntor Alstom JRM - Efeito Potencial de Falha.....	54
Tabela 9 - FMEA Disjuntor Alstom JRM - Ação Recomendada.....	55
Tabela 10 – Médias das notas atribuídas	56
Tabela 11 – RPN calculado	58
Tabela 12 – Ranking gerado pelo RPN	59
Tabela 12 - Grau de relação com índices propostos por Roos e Rosa (2008) .	63
Tabela 13 - Ranking com os índices de Roos e Rosa (2008)	64
Tabela 14 - Grau de relação com dados propostos por Chang <i>et al.</i> (2001)	66
Tabela 15 - Ranking com índices propostos por Chang <i>et al.</i> (2001)	67
Tabela 16 - Grau de relação com dados propostos por Leal <i>et al.</i> (2006)	69

Tabela 17 - Ranking obtidos com coeficientes propostos (Leal <i>et al.</i> 2006)	70
Tabela 18 - Quadro comparativo do Ranking	72

LISTA DE ABREVIATURAS

CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
Metrô	Companhia do Metropolitano de São Paulo
Eletropaulo	AES Eletropaulo
NBR	Norma Brasileira Registrada
NR	Norma Regulamentadora
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Modes, Effects and Critically Analysis</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CECAP	Caixa Estadual de Casas para o Povo
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> (Manutenção Centrada na Confiabilidade)
MTTF	Mean Time to Failure
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time to Repair
MUT	Mean Up Time (Tempo Médio de Disponibilidade)
MDT	Mean Down Time (Tempo Médio de Indisponibilidade)
SIL	Safety Integrity Level (Nível da Integridade de Segurança)

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volts
A	Ampères
W	Potência
I	Corrente elétrica
R	Resistência elétrica
SF6	Hexafluoreto de Enxofre
CO ₂	Dióxido de Carbono

Sumário

LISTA DE FIGURAS	- 5 -
LISTA DE TABELAS.....	- 5 -
LISTA DE ABREVIATURAS	- 7 -
LISTA DE SÍMBOLOS	- 8 -
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	13
1.2. JUSTIFICATIVA.....	15
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1. OBJETIVO GERAL.....	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
1.5. PROBLEMA E PERGUNTA DE PESQUISA.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. CONCEITOS PRINCIPAIS.....	19
2.1.1. SISTEMAS ELÉTRICOS.....	19
2.1.2. SUBESTAÇÕES DE TRAÇÃO ELÉTRICA.....	20
2.1.3. SISTEMAS DE TRAÇÃO ELÉTRICA.....	22
2.1.4. CONCEITOS DE CONFIABILIDADE	24
➤ FALHA.....	24
➤ CICLO DE VIDA DOS EQUIPAMENTOS.....	24
➤ MANUTENÇÃO.....	26
➤ CONFIABILIDADE	27
➤ DISPONIBILIDADE	29
➤ FMEA – ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E EFEITOS	30
➤ FMECA – ANÁLISE DE MODOS, EFEITOS E CRITICIDADE DA FALHA	34
➤ ANÁLISE RELACIONAL GREY	34
2.2. REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O TEMA	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1. ETAPAS DA PESQUISA	46
4. RESULTADOS	49
4.1. EMPRESA EM ESTUDO	49
4.2. IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO	49
4.3. OBJETO EM ESTUDO	50

4.4.	PESQUISA DE PERCEPÇÃO DE RISCO.....	50
4.5.	FMEA DO EQUIPAMENTO EM ESTUDO.....	52
4.5.1.	FORMULAÇÃO DO RPN.....	56
4.5.2.	APLICAÇÃO DA ANÁLISE RELACIONAL GREY	60
5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	72
6.	CONCLUSÕES.....	75
7.	CONTRIBUIÇÕES DE PESQUISA	77
8.	LIMITAÇÕES DE PESQUISA	78
9.	PROPOSTAS FUTURAS	79
10.	REFERÊNCIAS	80

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O grande aumento do número de veículos automotores nas vias com uma infraestrutura que não consegue evoluir para atender a demanda exigida, tornou o trânsito caótico nas regiões metropolitanas não somente nos horários de pico, mas ao longo de todo o dia. Além de serem os principais responsáveis pelos altos índices de poluição do ar (Fajersztajn, 2016), promovendo doenças respiratórias, também afetam a saúde das pessoas pela geração do estresse emocional nos congestionamentos. O sistema de transporte coletivo realizado por ônibus a diesel pode transportar de uma só vez o equivalente a cerca de 50 automóveis (considerando uma ocupação de 1,5 passageiros por veículo), gerando uma menor taxa de poluição (Carvalho, 2011). Já um trem do Metrô (Neto, 2019) pode transportar o equivalente a mais de 1000 automóveis ou cerca de 20 ônibus simultaneamente sem a emissão direta de qualquer fração de CO₂, visto possuírem tração elétrica, um modal energético que no Brasil, devido a sua grande maioria ser proveniente de hidrelétricas (Carvalho, 2011), emitem baixos valores de CO₂, quando comparados a países que possuem em sua grande maioria fontes termoelétricas.

Infelizmente a economia do país não é capaz de proporcionar um investimento maciço que possa atender esta evolução, assim como a modernização contínua dos meios de transporte de passageiros, principalmente os de transporte de massa, como são caracterizados os meios de transporte sobre trilhos.

Uma “solução” já implantada em alguns sistemas rodoviários e ferroviários no Brasil foi sua concessão temporária, com contratos milionários que envolvem sua manutenção e ampliação, em alguns casos.

O estudo Conjuntura do Transporte elaborado pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), mostra que as empresas concessionárias de rodovias e ferrovias investiram R\$ 11,99 bilhões (R\$ 6,74 bilhões em rodovias e R\$ 5,25 bilhões em ferrovias), valor que, descontada a inflação, é 7,1% menor do que o aplicado no ano anterior.

Apesar da queda real dos valores investidos em 2017, na comparação com o anterior, o volume já aplicado pelo setor privado em estradas e ferrovias desde 1995 – quando se iniciou o processo de concessões – alcançou R\$ 189,4 bilhões (CNT, 2018).

Ainda assim, é precária a situação da malha rodoviária nacional, como mostram os relatórios anuais sobre as estradas elaborados pela CNT. O mau estado das rodovias decorre, em boa parte, da quebra dos investimentos do setor público, que ainda é responsável por boa parte das estradas do País.

Visto que os custos de implantação possuem sempre valores expressivos para este tipo de modal, torna-se necessário criar métodos eficientes para manter estes sistemas ativos, mesmo que muitos deles já tenham atingido a “maturidade”, com o mínimo de falhas que possam impactar diretamente com os usuários.

Outro agravante está em não poder paralisar a qualquer hora do dia os sistemas para a execução de manutenção preventiva neste tipo de transporte, visto que a população dele dependem, necessitando que ela seja executada em sua grande maioria somente nas madrugadas onde o sistema não opera, visto não haver linhas “sobressalentes” para desviar o fluxo de passageiros, como acontece em alguns modais pelo mundo afora, possibilitando a realização de manutenção preventiva com parada da circulação mesmo durante o dia, sem prejudicar a população.

O pouco tempo que resta para a realização destas manutenções preventivas deve ser muito bem gasto, além de que muitas vezes não se consegue atuar em todos os equipamentos nos períodos estipulados pelos fabricantes devido aos curtos períodos em que são permitidos os acessos aos sistemas e equipamentos por dia ou madrugada.

A aplicação da Análise Relacional Grey no planejamento das atividades de manutenção poderá proporcionar uma melhoria na definição destas prioridades a serem tomadas, visto tratar-se de sistemas complexos, com um alto índice de equipamentos e sistemas, tornando-se uma ferramenta que venha a colaborar para a diminuição do número de falhas e ocorrências onde há a necessidade de realizar manutenções corretivas.

De princípio, a aplicação desta análise será voltada para o equipamento

escolhido, que é o disjuntor alimentador da tração elétrica, mas nada impede que seja estendido para os demais sistemas.

1.2. JUSTIFICATIVA

O estudo do ranking de priorização proposto apresenta grande relevância devido ao crescente aumento de falhas no sistema ferroviário de uma empresa do setor, visto às exigências a que são submetidos estes equipamentos.

Foi verificado que estes equipamentos correspondem ao segundo maior em número de falhas do setor de tração elétrica. Apesar de muitos equipamentos utilizados já pertencerem ao nível final da “curva da banheira”, a empresa em estudo não possui uma previsão para a substituição destes equipamentos, conforme apontado pelos próprios profissionais consultados que atuam no setor.

Para a escolha do equipamento a serem aplicada as ferramentas propostas foram analisadas as falhas ocorridas nos sistemas elétricos de 2015 a 2018.

A correta priorização para o planejamento de manutenção preventiva é primordial para diminuir o número de falhas que necessitem intervenção de manutenção corretiva. Este estudo visa verificar se este outro método de priorização é coerente e se poderá auxiliar neste planejamento, além de propiciar um estudo dirigido a um equipamento específico de tração elétrica.

No levantamento de artigos realizado não foram encontrados temas que relatam diretamente sobre a confiabilidade neste tipo de equipamento.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é verificar se a utilização da Análise Relacional Grey poderá melhorar o planejamento da manutenção preventiva em equipamentos do sistema elétrico de potência.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar se a literatura possui outros assuntos para servirem como base para a composição do resultado final do estudo em questão.
- Verificar com especialistas do setor se os resultados obtidos pelas análises estão coerentes com a realidade em campo.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho divide-se na sequência para entendimento do tema como:

O capítulo 1 – Introdução: inicia abordando a importância de investir nos meios de transportes, principalmente o de passageiros, a fim de atender à exigência da crescente população ativa, além de elencar dados atuais de como andam os sistemas concedidos para a iniciativa privada operar, manter e ampliar os serviços prestados, assim como o sistema, de acordo com o contrato firmado. Apresenta, ainda, alguns dos principais trabalhos pesquisados relacionados ao tema, assim como outros dados importantes de uma dissertação.

O capítulo 19 – Fundamentação Teórica: aborda os conceitos para o entendimento do sistema de tração elétrica, assim como apresenta as principais ferramentas utilizadas atualmente para se fazer gestão dos processos de manutenção e controle dos índices de falhas.

O capítulo 3 – Materiais e Métodos: Demonstra a sequência e forma com que foi

executado o trabalho.

O capítulo 4 – Resultados: Faz uma breve apresentação do sistema elétrico de potência abordado, apresentando dados reais coletados para a realização do estudo. Apresenta, ainda, a FMEA do equipamento, elencando os principais itens. Neste mesmo capítulo é realizado um comparativo dos resultados obtidos pelo método “tradicional” de obtenção do RPN e do obtido pela Análise Relacional Grey, utilizando-se de alguns pesos encontrados nas literaturas para os índices de ocorrência, detecção e severidade.

O capítulo 5 – Discussão dos Resultados: Traz um relato dos resultados obtidos com este trabalho.

O capítulo 6 – Conclusões: Realiza uma análise geral da nova ferramenta aplicada.

O capítulo 7 – Contribuições de Pesquisa: apresenta as contribuições acadêmicas e para a prática.

O capítulo 8 – Limitações de Pesquisa: Retrata as dificuldades apresentadas na elaboração do estudo.

O capítulo 9 – Propostas Futuras: Aponta a sequência de desenvolvimento para o trabalho.

O capítulo 10 – Referências: Lista as fontes utilizadas para a formalização deste trabalho, valendo ressaltar que, além dos artigos científicos e dissertações, outras fontes, tais como normas técnicas, revistas técnicas, encontros técnicos, jornais, etc., também foram analisados como forma de obtenção de uma base sólida para o desenvolvimento deste estudo.

1.5. PROBLEMA E PERGUNTA DE PESQUISA

A utilização da FMEA como ferramenta para a priorização da manutenção preventiva já é uma técnica comumente utilizada para este tratamento de falhas em equipamentos, assim como observado no trabalho de Sixer (2015), que em sua monografia para a obtenção do título de bacharelado em Química, apresentou um

estudo de priorização para a análise de riscos na qualidade do processo de embalagens em uma multinacional de agroquímicos. Já Ferreira *et al.* (2016) apresentaram uma proposta de um método para avaliação de riscos em FMEA de processos, considerando os custos de ocorrência no momento de detecção da falha, utilizando dados reais de uma empresa de autopeças do interior do estado de São Paulo, onde conseguiu-se verificar a viabilidade da aplicação dos custos de ocorrência dos modos de falha como um método de priorização na análise de risco, possibilitando identificar e direcionar as ações visando o impacto financeiro. Geum *et al.* (2011) utilizaram a Análise Relacional Grey como uma ferramenta de complementação do FMEA tradicional para a confecção do ranking de priorização. Sofyalioğlu e Öztürk (2012) realizaram uma comparação entre a FMEA tradicional, a Análise Relacional Grey e utilizando lógica Fuzzy para a geração dos pesos. Nesta comparação teórica não houve alteração do ranking de priorização para nenhum dos métodos apresentados. Roos e Rosa (2008) também fizeram uma comparação entre o método tradicional do FMEA com a análise gráfica e a Análise Relacional Grey, utilizando como base para o estudo uma empresa que realiza a prestação de serviços de transporte terrestre e aéreo de passageiros e cargas. Utilizaram em seu estudo um método gráfico, desconsiderando o índice detecção, obtendo blocos de prioridades sem nenhuma precisão e obtiveram resultados semelhantes de priorização para a Análise Relacional Grey e o RPN tradicional. Chang, Liu e Wei (2001) afirmaram em seu estudo que a Análise Relacional Grey é muito mais fácil e imparcial do que a FMEA tradicional, podendo aumentar a confiabilidade do produto e a estabilidade do processo, descobrindo problemas potenciais durante as etapas do projeto do produto e do planejamento do processo.

Não se conseguiu constatar nas pesquisas levantadas de artigos relacionados a utilização da Análise Relacional Grey para a análise de parâmetros de manutenção preventiva ou preditiva para equipamentos de tração elétrica, exaltando-se a pergunta:

- **A aplicação da Análise Relacional Grey como ferramenta de priorização no atendimento da manutenção preventiva ou preditiva é mais adequada que o uso do RPN tradicional?**

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONCEITOS PRINCIPAIS

Este capítulo apresentará um breve resumo dos principais conceitos necessários para o entendimento da aplicação da análise no sistema proposto, com um breve resumo dos principais sistemas abordados e das ferramentas de gestão das áreas de manutenção.

2.1.1. SISTEMAS ELÉTRICOS

Os sistemas elétricos voltados para a tração, necessários para viabilizar a circulação dos trens, podem ser subdivididos em dois conjuntos:

- Subestação de energia – responsável por receber a energia elétrica das concessionárias e transformá-las nos tipos e nos níveis necessários para alimentar os motores elétricos dos trens, podendo ser em corrente contínua, como ocorre com praticamente todos os sistemas de transporte sobre trilhos do Brasil e em corrente alternada, utilizada nos sistemas mais modernos em outros países. A utilização da corrente alternada neste tipo de transporte foi possível graças ao surgimento do inversor de frequência, que possibilitou que, com a variação desta, variasse a velocidade angular dos motores de tração. Subestações de energia são compostas por uma vasta quantidade de equipamentos e sistemas, sujeitas às ocorrências de falhas que podem comprometer a performance dos sistemas elétricos de potência.
- Rede aérea ou terceiro trilho – responsável por transportar e fornecer energia elétrica para os motores, fazendo a ligação entre as subestações de energia e os trens. Falhas neste sistema também podem impactar diretamente com a circulação, pois podem, além de interromper a continuidade de fornecimento de energia de tração, causar o desarme de parte das subestações de energia por curtos-circuitos, impossibilitando seu restabelecimento e utilização de métodos alternativos.

Nestes sistemas são programados ciclos de manutenção preventiva, de acordo

com a condição dos equipamentos e seus históricos. Hoje em dia os ciclos de manutenção visam a redução de custos e à ocorrência de falhas, principalmente as que podem paralisar o sistema, causando transtornos à população que se utiliza deste tipo de modal.

Estudos apontam que o índice de falhas pode ser definido pela “curva da banheira”, que pode ter variações com a implantação maciça dos métodos de manutenção preventiva e preditiva, assim como da modernização completa dos equipamentos.

2.1.2. SUBESTAÇÕES DE TRAÇÃO ELÉTRICA

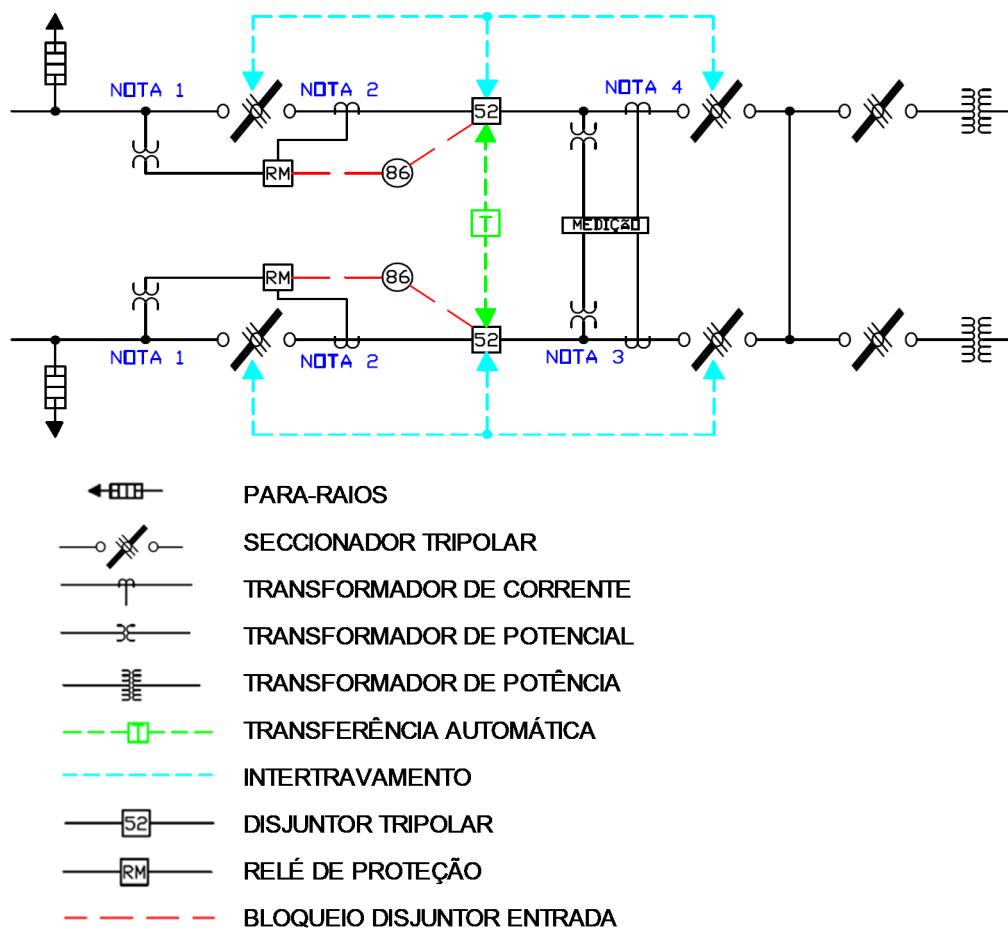
Como os veículos são projetados para transportar uma grande quantidade de passageiros que requerem uma estrutura adequada para tal, prevendo o aumento de massa com sua lotação, consequentemente, necessitam de motores potentes para atender às exigências de aceleração e velocidade impostas. Normalmente são utilizados quatro motores por cada carro. A exemplo dos carros fabricados pela empresa Alstom, que possuem quatro motores de 148 kW cada, para uma composição de seis carros, possui uma potência total de 3552 kW, o que equivale a aproximadamente seiscentos chuveiros elétricos ligados simultaneamente.

Desta forma, no caso das máquinas elétricas, como consomem grande quantidade de energia, necessitam, na grande maioria das vezes, possuírem fontes de alimentações dedicadas, recebendo energia primária diretamente das concessionárias.

Uma subestação “padrão” (Enel, 2019) pode ser verificada conforme apresentado na figura 2, que apresenta seus principais componentes, frisando os equipamentos de proteção necessários para sua composição, dentre os quais destaca-se o relé de proteção multifuncional (RM), responsável por liberar ou bloquear a manobra no disjuntor tripolar (52), através do relé de bloqueio (86), os para-raios de entrada necessários para extinguir as descargas atmosféricas nas linhas de entrada da subestação de energia e as chaves seccionadoras tripolares, utilizadas para garantir a abertura e seccionamento dos circuitos. Nestes equipamentos de alta tensão, a maior diferença entre as chaves seccionadoras e os disjuntores (ambos

utilizados para seccionar circuitos elétricos), está nas possibilidades de proteções existentes para os disjuntores, que podem ser operados sob carga, ou seja, mesmo que haja a passagem de corrente elétrica por eles durante seu seccionamento, suportam o arco elétrico gerado, possuindo um sistema próprio de extinção deste arco elétrico. Já as chaves seccionadoras não são capazes de suportar o seccionamento sob carga, havendo um intertravamento elétrico, conforme mostrado nas linhas tracejadas da figura 1, responsáveis por bloquear a comutação destas chaves, caso o disjuntor esteja armado.

Figura 1 - Subestação de Energia



Fonte: Enel (2019)

Estas subestações de energia recebem em sua entrada 69, 88 ou 138 kV, as

quais são transformadas para os níveis necessários de utilização. O nível de tensão mais utilizado nos bairros para a alimentação dos transformadores de distribuição, localizados nos postes das ruas, é de 13,8 kV, mas podemos ter linhas aéreas em 34,5kV, geralmente utilizadas para alimentar subestações secundárias e de 25,0 kV.

No caso das cargas que necessitem de energia em corrente contínua, como é o caso da energia de tração elétrica utilizada, principalmente, no Brasil e Rússia, utilizam transformadores de potência especiais para facilitar a sua conversão através de grupos retificadores, assim como de suportar este tipo de consumo, que em momentos pode exceder os valores para que foram projetados por serem cargas móveis.

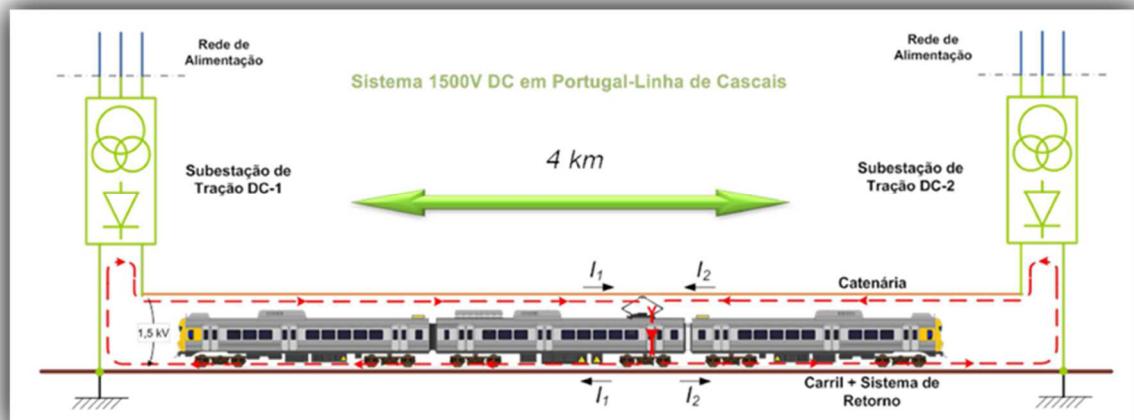
2.1.3. SISTEMAS DE TRAÇÃO ELÉTRICA

O sistema de tração das grandes metrópoles geralmente opera em anel, confrontando a energia proveniente de uma subestação de energia com sua adjacente, ou seja, mesmo que ocorra um desarme em uma das subestações de tração a outra assume, continuando a alimentação do trem em seu circuito normalmente. Um grande entrave neste sistema é que os desarmes dos alimentadores podem ocorrer em cadeia, caso atuem as proteções por sobrecarga ou curto-círcuito nas cargas, geralmente nos motores de tração.

Este mesmo sistema continua sendo utilizado em várias ferrovias do mundo, assim como demonstrado por Folgado (2013), que apresenta o sistema de tração elétrica utilizado em Portugal, como pode ser observado a partir da Figura 2 - Esquema elétrico de alimentação da rede de tração elétrica entre duas subestações.

Quanto maior for o distanciamento das fontes de energia, a sensibilidade de proteção diminui, o que pode acarretar num retard no desarme dos disjuntores de proteção elétrica, conforme aponta Xiao *et al.* (2003).

Figura 2 - Esquema elétrico de alimentação da rede de tração elétrica entre duas subestações



Fonte: Folgado (2013)

Os níveis de tensão em corrente contínua mais utilizados atualmente são de 3 kV (utilizado na CPTM, em São Paulo), 1,5 kV (utilizado na Linha 4 do Metrô de São Paulo), 750 V (utilizado nas Linhas 1, 2, 3 e 5 do Metrô de São Paulo), de 600 V e de 825 V em algumas ferrovias em outros países (Malozymov, 2017).

O sistema de tração elétrica em corrente alternada com níveis de tensão em 25 kV surgiu em Portugal em 1996 (Folgado, 2013), permitindo um maior espaçamento na distribuição da corrente elétrica de tração e a diminuição de perdas no trecho, além de necessitar de equipamentos que trabalhem com uma corrente bem menor para as proteções por sobrecarga devido seu nível de tensão, visto que a passagem da corrente elétrica é inversamente proporcional a sua tensão aplicada.

Em resumo, o aumento do nível de tensão acaba exigindo uma menor bitola nos cabos de alimentação e distribuição, diminuindo seu custo de implantação e manutenção conforme explica Munteanu *et al.* (2015). Esta diminuição na corrente elétrica, além de permitir utilizar cabos com bitolas menores, também minimiza o desgaste dos contatos elétricos dos equipamentos.

A implementação inicial dos sistemas de tração elétrica em corrente contínua se deu ao fato de não haver, na época, tecnologias capazes de alterar a velocidade dos motores em corrente alternada e que hoje, geralmente, são efetuados com inversores de frequência. Muitos trens modernos, apesar de receberem em seu sistema de

captação a energia elétrica em corrente contínua, acaba transformando em corrente alternada para alimentar os motores elétricos, que proporcionam um rendimento superior aos sistemas de variação em corrente contínua. Esta adaptação se faz necessária devido ao fato da necessidade de substituir todo o sistema elétrico de potência, assim como de transmissão para os níveis de tensão como foi realizado em Portugal (Folgado, 2013) a um custo aproximado de 40 milhões de reais cada subestação de energia.

2.1.4. CONCEITOS DE CONFIABILIDADE

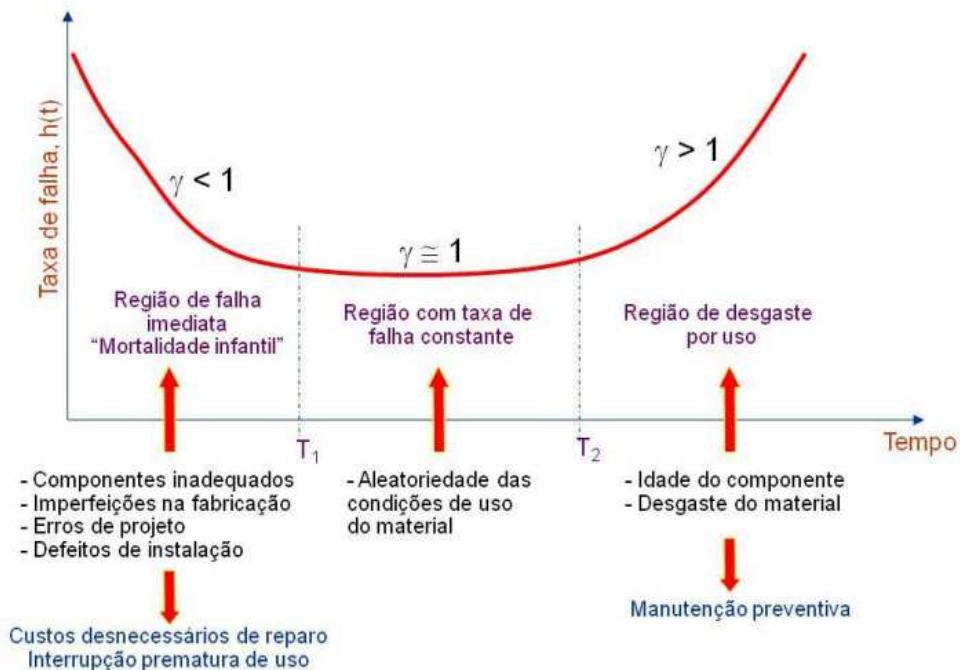
➤ FALHA

Uma falha se caracteriza como sendo o término da capacidade de um item em desempenhar sua função requerida, segundo a NBR 5462 (1994). A consequência da geração de uma falha é uma pane, que é um estado caracterizado pela incapacidade de desempenhar esta função, excluindo a incapacidade gerada durante as paralizações geradas para atendimento dos serviços de manutenções programadas.

➤ CICLO DE VIDA DOS EQUIPAMENTOS

A “vida” de um equipamento eletromecânico obedece a uma curva característica, mais conhecida como “Curva da Banheira”, conforme apresentado na figura 3, onde desde sua implantação até que o equipamento atinja índices de falhas aceitáveis, passa por um período turbulento devido aos ajustes necessários. Este período turbulento volta a se repetir no final de sua vida útil, sendo gerada a dúvida se é melhor realizar uma remodelação ou sucateamento do equipamento, visto que mesmo obedecendo os ciclos de manutenção preventiva, o índice de falhas continua aumentando.

Figura 3 - Curva da banheira



Fonte: Reis e Andrade (2009)

Esta curva de banheira clássica apresenta três estágios:

- I. Região de falha imediata (mortalidade infantil), que vem associada às falhas geradas devido aos ajustes de implantação do equipamento, motivo pelo qual normalmente há um período de operação assistida pelas empresas responsáveis pelas implantações de um ano, a partir do momento de seu comissionamento e entrega para a operação;
- II. Região com taxa de falha constante, que começa a contar quando há uma estabilidade no funcionamento do equipamento;
- III. Região de desgaste por uso, que corresponde ao período de desgaste dos equipamentos, que pode ser minimizado com sua modernização e com o planejamento adequado dos ciclos de manutenções.

Ebeling (1997) expressou esta noção de curva de banheira como um composto de várias distribuições de falhas e a fórmula como “uma função de taxas de falhas lineares e constantes por partes”.

➤ MANUTENÇÃO

A manutenção, segundo a NBR 5462 (1994), engloba a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, inclusive as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

Os setores de manutenção de uma empresa, geralmente, são pouco notados de uma forma geral, visto que só “aparecem” para o conhecimento da alta cúpula quando o equipamento ou sistema for paralisado, afetando o funcionamento ou interferindo na produção. Nas empresas públicas este problema se agrava, visto que, se tudo está correndo bem, a manutenção sequer é lembrada. Pode-se notar que dificilmente ouve-se divulgar índices de avarias de equipamentos nas empresas, salvo quando ocorre um acidente de grandes proporções ou que a mídia divulgue, pois pode denegrir a imagem da empresa. Ninguém quer ser lembrado porque seus equipamentos não operam bem, ou seja, o sistema não está confiável.

Segundo Fonseca *et al.* (2016), uma manutenção mal gerenciada em uma empresa pode gerar altos gastos, sendo que um bom planejamento da manutenção proporciona o aumento da disponibilidade dos equipamentos, melhorando o desempenho dos sistemas com o consequente aumento da confiabilidade e segurança da operacionalização do sistema.

Com a aplicação deste conceito, os custos tendem a serem minimizados ou, pelo menos, controlados, principalmente no que se refere aos prejuízos causados pela paralisação parcial ou total de um equipamento ou sistema. Desta forma, será necessário o emprego de planos de manutenção capazes de proporcionar índices aceitáveis de falhas nos equipamentos e sistemas. Xenos (2002) afirma que a manutenção pode ser definida como um conjunto de atividades desenvolvidas nos equipamentos e sistemas com o objetivo de manter as funções para que foram projetadas, melhorando sua disponibilidade, assim como do sistema produtivo como um todo.

A NBR 5462 retrata os tipos de manutenção, baseadas de acordo com as intervenções a serem realizadas:

- Manutenção corretiva: manutenção requerida para atendimento imediato ou programado, pois houve a paralização do equipamento ou não está desempenhando sua função adequadamente. Este tipo de manutenção pode ocasionar prejuízos incalculáveis para a empresa, ainda mais se ocorrer em sistemas prioritários, podendo gerar a ociosidade de funcionários, perda de prazos de entrega de produção, acidentes com empregados, etc. Nos casos de transportes de passageiros o problema se agrava, visto que pode interferir nos compromissos dos passageiros, denegrindo a imagem da empresa.
- Manutenção preventiva: manutenção programada periodicamente em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um determinado item.
- Manutenção preditiva ou controlada: é a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou por amostragem para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva, assim como diminuir a manutenção corretiva.

➤ CONFIABILIDADE

A NBR 5462 trata a confiabilidade como a capacidade de um item em desempenhar sua função requerida sob as condições especificadas durante um período.

Silva e Ribeiro (2009) afirmam que o índice de confiabilidade pode ser definido como um componente em desempenhar adequadamente seu propósito especificado por um determinado período de tempo e sob condições ambientais pré-determinadas. Matematicamente pode ser descrita como a probabilidade de um componente em cumprir sua função com sucesso (Fogliatto, 2006).

A confiabilidade de um determinado item é definida (Fogliatto, 2006) como sendo a probabilidade do mesmo em cumprir a função para a qual foi concebido, podendo

assumir uma escala de valores, sendo calculada por axiomas da probabilidade. A confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas, ou seja, confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operação estabelecidas, por um período de tempo predeterminado.

Os conceitos de confiabilidade e qualidade estão atrelados entre si, o que faz com que frequentemente eles sejam confundidos entre si. Confiabilidade incorpora a passagem do tempo, o que não ocorre com a qualidade, já que consiste na descrição de um item. Um exemplo dado por Fogliatto e Ribeiro (2009) é o de dois transistores, que apresentam qualidade idêntica, mas o primeiro transistor possui uma confiabilidade provavelmente maior, pois será usado em um ambiente de menor estresse. Pode-se concluir que alta confiabilidade implica em qualidade, porém a recíproca não é verdadeira.

Fogliatto e Ribeiro (2009) definem ainda:

- **Qualidade:** pode ser definida como cumprimento das especificações de projeto e manufatura com o mínimo de variabilidade possível;
- **Manutenabilidade:** é definida como a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas mediante condições preestabelecidas de uso, uma vez que houve a sua manutenção;
- **Segurança:** é a ausência de condições que causam danos físicos ou ocupacionais a pessoas, bem como danos ou perdas materiais;
- **MTTF (*mean time to failure*) ou tempo médio até falhar:** utilizado para produtos ou componentes não reparáveis;
- **MTBF (*mean time between failures*) ou tempo médio entre as falhas:** utilizado para produtos ou componentes reparáveis;
- **MTTR (*mean time to repair*) ou tempo médio de reparo:**

➤ DISPONIBILIDADE

Segundo Kardec e Nascif (2012), a disponibilidade pode ser considerada como o tempo em que o equipamento, sistema ou instalação está disponível para operar ou em condições de produzir algo.

Pode ser calculada pela relação entre o tempo médio em que o equipamento ou sistema esteja operando num determinado período pela soma deste tempo médio com o tempo médio em que o equipamento ou sistema esteve parado neste período, conforme a Equação 1:

$$D = \left(\frac{\text{MUT}}{\text{MUT} + \text{MDT}} \right) \times 100$$

(Equação 1)

Na qual:

- MUT: *Mean up time* (Tempo médio de disponibilidade)
- MDT: *Mean down time* (Tempo médio de indisponibilidade)

A Disponibilidade indica o grau em que o equipamento (ou parte dele) estará em condições para iniciar a missão, quando esta for solicitada, num instante determinado, podendo, também, ser obtida através da seguinte expressão:

$$D = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

(Equação 2)

Tais conceitos estabelecem parâmetros para o aparecimento de falhas nos produtos ou sistemas e os princípios e métodos que devem ser adotados nas fases de planejamento, projeto, fabricação, recepção, transporte e operação, de modo a assegurar-lhes o máximo de eficiência, segurança e economia.

➤ FMEA – ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E EFEITOS

Sakurada (2001) explica que a FMEA teve sua origem nos Estados Unidos no dia 9 de novembro de 1949, como um padrão para as operações militares - *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (Military Procedures)*. Esta norma foi utilizada como uma técnica de avaliação da confiabilidade para determinar os efeitos nos sistemas e falhas em equipamentos.

Todo equipamento, seja ele mecânico, elétrico, pneumático, etc., está suscetível a falhar. Segundo a NBR 5462 (1994) uma falha significa o término da capacidade de um item desempenhar sua função requerida. A fim de tornar a manutenção preventiva mais precisa, antecipando a ocorrência de uma falha, que muitas vezes pode chegar a parar o equipamento, existem vários métodos gerados ao longo do tempo, sendo a FMEA (Análise de Modos de Falhas e Efeitos) a ferramenta mais usual utilizada para esta análise (SOUZA, 2010).

A FMEA tem sido utilizada nas mais diversas áreas, em diferentes equipamentos e sistemas:

- Equipamentos de semicondutores (VILLACOURT, 1992);
- Sistemas hidráulicos e pneumáticos (LATINO, 1996), (BULL *et al.*, 1995);
- Circuitos elétricos (PRICE, 1996);
- Desenvolvimento de reator termonuclear (PINNA *et al.*, 1998).

Além da técnica da FMEA tradicional apontar a função, o modo de falha, o efeito potencial de falha e a ação recomendada caso o equipamento ou determinado componente falhar, pode utilizar índices de hierarquização conforme o risco existente. Tal risco leva em consideração três fatores: Ocorrência $X_{(O)}$, Detecção $X_{(D)}$ e Severidade $X_{(S)}$.

Através destes três fatores, calcula-se o RPN (*Risk Priority Number*), tratando-se de uma combinação entre eles, que é gerado por meio de uma multiplicação direta entre os dados no método tradicional (Youngjung, 2011), como pode ser observado na equação 3:

$$RPN = X_i(O) \cdot X_i(D) \cdot X_i(S)$$

(Equação 3)

- PERCEPÇÃO DE RISCO

Leal *et al.* (2006) sugerem as tabelas de priorização para o índice de ocorrência, detecção e severidade, adaptado da Ford Motor Company (1988):

Para a ocorrência da falha, na Tabela 1, pode-se verificar o nível de risco de ocorrência de falha onde, quanto maior for o grau da percepção de risco de ocorrência da falha, maior será o risco de ocorrência de falhas, sendo, por exemplo, estipulada a nota “1” onde a ocorrência de uma falha é quase impossível de acontecer com determinado equipamento ou componente e a nota “10” determina que ocorram falhas recorrentes.

Tabela 1 - Percepção de risco de ocorrência da falha

EFEITO	GRAU
EXTREMAMENTE ALTA (QUASE INEVITÁVEL)	10
MUITO ALTA	9
REPETIDAS FALHAS	8
ALTA	7
MODERADAMENTE ALTA	6
MODERADA	5
RELATIVAMENTE BAIXA	4
BAIXA	3
REMOTA	2
QUASE IMPOSSÍVEL	1

Fonte: Leal *et al.* (2006)

A Tabela 2 apresenta a percepção de risco de detecção de falha, onde o grau de percepção de risco de detecção da falha vai aumentando à medida que se consegue melhor prever a ocorrência de falhas em determinado componente ou equipamento.

Tabela 2 - Percepção de risco de detecção da falha

DETECÇÃO	GRAU
ABSOLUTAMENTE INCERTA	10
MUITO REMOTA	9
REMOTA	8
MUITO BAIXA	7
BAIXA	6
MODERADA	5
MODERADAMENTE ALTA	4
ALTA	3
MUITO ALTA	2
QUASE CERTA	1

Fonte: Leal *et al.* (2006)

Para o grau de percepção de risco de severidade dos efeitos da falha (Tabela 3), o grau “1” significa que, caso o equipamento ou componente falhe, as consequências são insignificativas para o resto do sistema.

Tabela 3 - Percepção de risco de severidade dos efeitos da falha

EFEITO	GRAU
PERIGOSO	10
SÉRIO	9

IMPORTANTE	8
IMPACTANTE	7
SIGNIFICATIVO	6
MODERADO	5
BAIXO	4
DESPREZÍVEL	3
MUITO DESPREZÍVEL	2
NENHUM	1

Fonte: Leal *et al.* (2006)

Quanto maior o grau de percepção de risco de severidade, a ocorrência de uma falha poderá causar danos expressivos ao equipamento ou sistema.

- REPETIÇÃO DE FATORES

O grande problema encontrado com a utilização desta técnica é que, algumas vezes, a combinação destes fatores apresenta resultados iguais ou, com uma pequena variação de um dos fatores, seu RPN altera consideravelmente, o que pode não condizer com a realidade, além de serem tratados com o mesmo peso (Pillay, 2003).

Liu *et al.* (2013), Gargama e Chaturverdi (2011), Sharma (2010), Chang, Liu e Wei (2001) apontam as seguintes limitações:

- A importância relativa entre severidade, ocorrência e detecção não é tida em consideração;
- A interdependência entre os vários modos de falha e seus efeitos não é levada em consideração;
- Os três fatores de risco são difíceis de avaliar de forma precisa;
- O RPN ignora o efeito da quantidade de produção;

- O RPN não considera pesos para os fatores, estes pesos podem existir na vida real.

De acordo com os autores Gargama e Chaturvedi (2011); Liu *et al.* (2013); Sharma e Sharma (2010) combinações diferentes de severidade, detecção e ocorrência podem produzir exatamente os mesmos resultados de RPN, apesar de suas implicações no risco poderem ser totalmente diferentes.

➤ **FMECA – ANÁLISE DE MODOS, EFEITOS E CRITICIDADE DA FALHA**

Trata-se de outra ferramenta utilizada, significando Análise de Criticidade, Modos e Efeitos de Falhas, diferenciando, principalmente, da FMEA (Herpich; Fogliatto, 2013), que é mais ligada ao aspecto qualitativo, incluindo o que se denomina a análise crítica, que é um método quantitativo utilizado para classificar os modos e efeitos de falhas críticas, levando em consideração suas probabilidades de ocorrência.

A identificação da função de cada componente, seus modos potenciais de falha, seus efeitos e suas causas e, por consequência, a classificação dos graus de criticidade, são resultados da aplicação da ferramenta de Análise de Criticidade e Modo de Efeito de Falhas (Fogliatto; Ribeiro, 2009).

➤ **ANÁLISE RELACIONAL GREY**

A Análise Relacional Grey ou simplesmente: Teoria Grey, foi proposta por Julong Deng em 1982, que desenvolveu um método para o cálculo mais preciso do RPN, levando em consideração a mensuração para analisar a relação entre as séries qualitativas e quantitativas discretas, assim como os demais componentes das séries através de características pré-definidas. Ela lida com decisões caracterizadas por informações incompletas e explora o comportamento do sistema usando análise relacional e construção de modelo. A Análise Relacional de Grey fornece uma medida para analisar a relação entre séries quantitativas e qualitativas discretas.

Segundo Geum, Cho e Park (2011) o método tradicional de priorização de risco da FMEA leva à multiplicação dos fatores de severidade, ocorrência e detecção.

Explicam que a análise é chamada de Grey por não ser exata, ou seja, nem preto e nem branco, retrata melhor a realidade e auxilia na tomada de decisões. Por esta razão a análise acaba levando vantagens competitivas em termos de processamento efetivo de incertezas se comparada com outras, além de permitir a atribuição de diferentes coeficientes de ponderação aos fatores.

A análise relacional Grey é um método de tomada de decisões em um ambiente de incertezas, caracterizado por informações sob a circunstância de decisão multidimensional, proporcionando uma abordagem flexível usando diferentes coeficientes de ponderação, a fim de se conseguir resultados mais reais.

Esta análise pode ser aplicada em diversos segmentos, sendo aplicada até na previsão de vendas de automóveis (CASTRO, 2011) e na implementação da análise dos modos de falha e seus efeitos no processo de fabricação de peças em material compósito, cuja estrutura é formada por dois ou mais materiais que não são solúveis entre si (BRAGANÇA, 2013).

Sofyalioğlu e Öztürk (2012) afirmaram que a Análise Relacional Grey já provou ser um método simples e preciso na solução de problemas de decisão de múltiplos atributos.

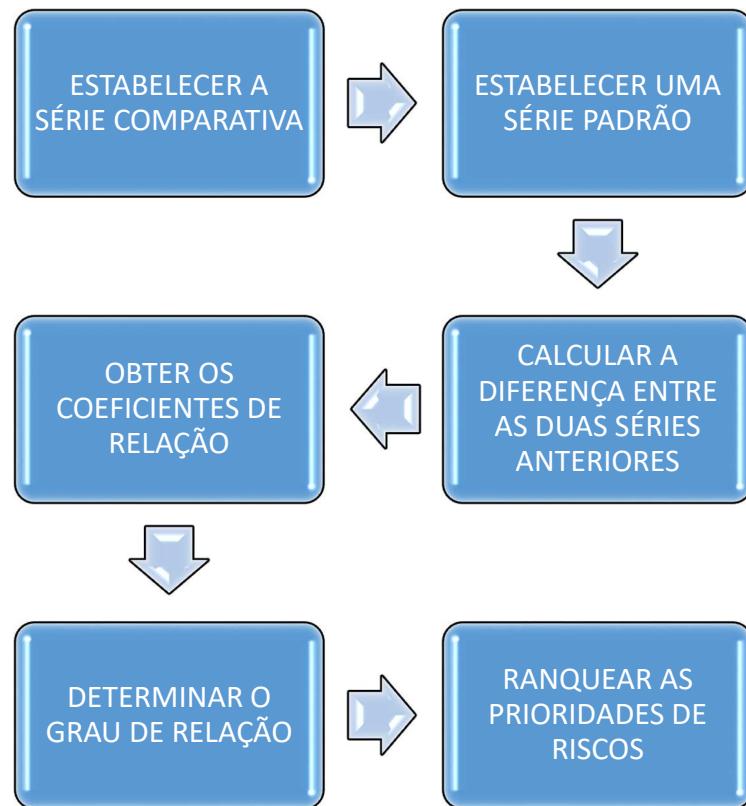
Chang *et al.* (1996 e 1998) afirmaram que, para a aplicação da Análise Relacional Grey as variáveis devem possuir as seguintes características: ser fisicamente existente, contável, extensível e independente. A análise relacional Grey é capaz de atribuir peso relativo aos fatores de decisão, portanto, a racionalidade da FMEA pode ser melhorada. Esta é a primeira tentativa de considerar a importância relativa dos fatores. A Análise Relacional Grey também pode priorizar os riscos potenciais de falhas de produto ou processo sem qualquer função de utilidade.

Razia *et al.* (2013) utilizaram a análise Grey para classificar várias alternativas e determinar a melhor estratégia de solução para as falhas mais críticas em máquinas CNC. Os resultados deste método mostram que o modelo proposto foi capaz de detectar uma das maiores dificuldades de se obter com a lógica fuzzy e encontra a estratégia de solução mais importante usando a técnica FMEA. Afirma, ainda, que este método é mais aplicável em técnicas de tomada de decisões em grupo, pois com mais ideias expostas surgem melhores soluções para detectar falhas.

IMPLEMENTAÇÃO DA ANÁLISE RELACIONAL GREY

O método para aplicação da Análise Relacional Grey estipulado por Chang *et al.* (1999) obedece aos passos estipulados pela Figura 4.

Figura 4 - Aplicação da Análise Relacional Grey



Fonte: O autor (2019)

Tais passos são detalhados na sequência:

1º Estabelecer a série comparativa: por meio dos dados obtidos dos graus de percepção de cada componente ou falha, deve-se montar a matriz 1.

$$X = \begin{bmatrix} X_1(O) & X_1(D) & X_1(S) \\ X_2(O) & X_2(D) & X_2(S) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n(O) & X_n(D) & X_n(S) \end{bmatrix} \quad (Matriz\ 1)$$

Na qual:

- X : Matriz com as notas atribuídas a cada componente ou tipo de falha.
- $X_i(O)$, $X_i(D)$ e $X_i(S)$: notas atribuídas aos critérios de ocorrência, detecção e severidade, respectivamente.

2º Estabelecer uma série padrão: Desenvolvida através do menor valor da matriz gerada dos graus de percepção (matriz 1), visando minimizar os potenciais riscos.

$$X_0 = [X_0(O) \quad X_0(D) \quad X_0(S)] \quad (Matriz\ 2)$$

3º Calcular a diferença entre a série comparativa e a série padrão: A diferença entre os valores dos fatores dos graus de percepção e da série padrão deve ser determinada e expressa em uma matriz.

$$D = \begin{bmatrix} \Delta O_1 & \Delta D_1 & \Delta S_1 \\ \Delta O_2 & \Delta D_2 & \Delta S_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta O_n & \Delta D_n & \Delta S_n \end{bmatrix} \quad (Matriz\ 3)$$

Na qual:

- D: Matriz com os resultados obtidos pela diferença.
- $\Delta O_i, \Delta D_i, \Delta S_i$: Resultados das diferenças encontradas.

4º Obter os coeficientes de relação: Comparando-se os fatores dos graus de percepção com a série padrão, deve-se levar em consideração os valores obtidos pela máxima e pela mínima diferença obtidas na matriz 3 para a obtenção dos coeficientes de relação para os fatores: ocorrência (equação 4), detecção (equação 5) e severidade (equação 6).

$$\gamma O_i = \frac{\Delta_{MIN} + \xi \Delta_{MAX}}{\Delta O_i + \xi \Delta_{MAX}} \quad (Equação 4)$$

$$\gamma D_i = \frac{\Delta_{MIN} + \xi \Delta_{MAX}}{\Delta D_i + \xi \Delta_{MAX}} \quad (Equação 5)$$

$$\gamma S_i = \frac{\Delta_{MIN} + \xi \Delta_{MAX}}{\Delta S_i + \xi \Delta_{MAX}} \quad (Equação 6)$$

O indicador ξ pode assumir valores entre 0 e 1, sendo que este identificador afeta apenas o valor referente ao risco sem alterar a prioridade. Segundo Chang *et al.* (2001), normalmente, adota-se o valor de 0,5.

5º Determinar o grau de relação: Nesta etapa devem ser decididos os pesos relativos (α) aos fatores de ocorrência, detecção e severidade, para compor a correta relação, de acordo com o equipamento ou tipo de falha em estudo, obtendo o grau de relação (C_i) através da equação 7.

$$C_i = \gamma O_i \cdot \alpha_o + \gamma D_i \cdot \alpha_D + \gamma S_i \cdot \alpha_S$$

(Equação 7)

Onde:

- γ : coeficientes obtidos nas equações 4, 5 e 6.
- α_o , α_D , α_S : pesos relativos aos fatores de ocorrência, detecção e severidade, respectivamente, onde suas somas contabilizam a unidade (100%).

6º Ranquear as prioridades de risco: Atribuir o nível da hierarquia a partir da análise do grau de relação. Quanto menor este valor, mais prioritário será o equipamento ou tipo de falha a ser analisado.

2.2.REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O TEMA

Neste estudo foram encontrados aproximadamente 180 artigos, pesquisados a partir das bases: CAPES, Scielo, Science Direct, Ieee, Google Acadêmico, utilizando-se das palavras-chaves: FMEA, GREY, CONFIABILIDADE, RCM – Manutenção Centrada na Confiabilidade, disjuntor alimentador de tração elétrica e subestações de energia. Destes artigos, foram selecionados aproximadamente 50 para servirem de base direta para a formulação deste estudo. A grande maioria encontrada foi referente à FMEA, confiabilidade e subestação de energia, visto já serem temas amplamente estudados e consagrados na literatura.

Dentre os artigos encontrados durante as pesquisas, pode-se destacar os principais que serviram como base para este estudo:

Sprong (2008) explicou que a manutenção é uma das atividades que gastam

mais recursos em qualquer planta de subestações de energia de tração elétrica. É necessária a realização de manutenções preventivas a fim de não gerar falhas que podem impactar no andamento do sistema. A não realização destas manutenções podem gerar falhas catastróficas.

Dunn (2005) afirmou que avançadas tecnologias necessitam ser empregadas para verificar as condições dos equipamentos e prevenir potencialmente o número de falhas geradas. A implementação prática dos conhecimentos desenvolvidos neste estudo visa antever o surgimento de falhas, através da melhoria da política de manutenção preventiva.

Souza (2010) abordou a integração da automação dos sistemas de subestações de energia em uma empresa de transporte sobre trilhos, assim como os ganhos de confiabilidade que podem ser obtidos com esta integração. Ele aborda especificamente os sistemas de energia do Metrô de São Paulo, realizando um levantamento das ocorrências no setor entre 2006 e 2008.

Herpich e Fogliatto (2013) trataram da confiabilidade em sistemas de controle e instrumentação de turbo geradores. Eles recorrem a RCM – Manutenção Centrada na Confiabilidade, como um método de planejamento da manutenção, apresentando um estudo baseado no FMECA, tratando os equipamentos críticos do sistema de controle e instrumentação de turbo geradores. Visam a redução dos custos de manutenção corretiva e preventiva, melhorando sua confiabilidade.

Saxer (2015) utilizou em sua monografia a aplicação do FMEA no gerenciamento de riscos de qualidade do processo de fabricação de embalagens em uma indústria química, assim como implementa ações preventivas e corretivas, obedecendo os dados encontrados no processo.

Ferreira *et al.* (2016) apresentaram uma proposta de um método para avaliação de riscos em FMEA de processos, considerando os custos de ocorrência no momento de detecção da falha, utilizando dados reais de uma empresa de autopeças do interior do estado de São Paulo. O resultado obtido foi a viabilidade da aplicação dos custos de ocorrência do modo de falha em sua etapa de detecção, como um novo método para priorização na análise de risco, o que possibilita a empresa identificar e direcionar as ações nas etapas que detém o maior impacto financeiro.

Szmel e Wawrzyniak (2017) aplicaram o método FMEA na sinalização ferroviária, voltado para a análise de segurança, levando em consideração que este sistema precisa cumprir o requisito SIL4 de segurança, permanecendo seguro em caso da ocorrência de qualquer tipo de falha.

Kangb *et al.* (2017) utilizaram a FMEA como avaliação de risco para estudar a conexão entre os modos de falha e seus efeitos na probabilidade de falhas de todos os sistemas de turbinas eólicas flutuantes existentes em um determinado campo de geração de energia na China, obtendo requisitos que possam ser utilizados em projetos futuros destas turbinas em relação aos aspectos de segurança e confiabilidade.

Suyu *et al.* (2016) utilizou a FMEA para estudar os fatores de risco em unidades de esterilização em hospitais, visto que estas unidades são os principais pontos em relação aos fatores de risco nos hospitais. Concretizam o trabalho apresentando um estudo de caso em um hospital de grande porte na Turquia, comparando o método tradicional com a fuzzy FMEA para demonstrar a eficácia dos métodos propostos.

Alimohammadi e Adl (2013) utilizaram a FMEA para determinar a qualidade do sistema de manutenção e os efeitos de seus componentes nas falhas de fornos em duas empresas produtoras de gesso no Irã. Através desta ferramenta verificaram que havia uma diferença no nível de qualidade da manutenção de dois fornos da empresa em estudo, em que as falhas de baixa gravidade causaram um maior custo de reparação em relação às outras falhas mais graves.

Herpich e Fogliatto (2013) aplicaram a FMECA para identificar e classificar os equipamentos críticos nos sistemas de turbo geradores, apresentando os graus de risco dos modos de falha em termos de segurança, meio ambiente, perdas de produção e custos de manutenção, definindo a melhor estratégia de manutenção, a fim de otimizar os planos de manutenção, reduzindo custos com manutenções preventivas e, principalmente, corretivas, visando aumentar a confiabilidade do equipamento.

Spreafico, Russo e Rizzi (2017) apresentaram uma revisão crítica da FMEA, identificando os problemas mais atuais, os caminhos de melhoria e quais outros métodos e ferramentas são propostos para serem integrados ao FMEA. Realiza uma

comparação dos estudos acadêmicos com os utilizados nas indústrias. Neste estudo não é abordado qualquer método de melhoria de priorização de atendimento de equipamento.

Chanamool e Naenna (2016) utilizaram o método Fuzzy – FMEA para auxiliar na escolha da priorização e avaliação de falhas que ocorrem no processo de trabalho de um departamento de emergência de um hospital, a fim de ajudar a área na melhoria da gestão de manutenção, a fim de aumentar o nível de confiabilidade do hospital.

Mandal e Maiti (2014) abordaram uma metodologia do Fuzzy – FMEA que integra conceitos de medidas de valores de similaridades de números Fuzzy e suas possibilidades de ocorrência, tornando-se mais robusta por não requerer operações arbitrárias precisas como a “defuzzificação” a fim de priorizar os modos de falhas.

Roos e Rosa (2008) fizeram uma comparação entre o método tradicional do FMEA com a análise gráfica e a Análise Relacional Grey, realizando um estudo empírico em uma empresa que realiza a prestação de serviços de transporte terrestre e aéreo de passageiros e cargas. O artigo não aponta qual equipamento ou sistema que foram extraídos os dados para análise, mas utiliza os índices para detecção, ocorrência e severidade igualmente divididos (1/3) para obter os dados pela Análise Relacional Grey. Afirmaram que o método baseado na análise apresenta infinitos resultados possíveis entre os valores 0 e 1 em razão da possibilidade de atribuir-se pesos infinitos aos índices de severidade, detecção e ocorrência, assim como ao identificador relativo do risco. O método gráfico apresenta três principais resultados possíveis: alta, média ou baixa prioridade. E o método tradicional, baseado no RPN, apresenta 120 resultados possíveis entre os valores 1 e 1000. Utilizaram em seu estudo um método gráfico, desconsiderando o índice detecção, obtendo blocos de prioridades sem nenhuma precisão e obteve resultados semelhantes de priorização para a Análise Relacional Grey e o RPN tradicional.

Geum, Cho e Park (2011) afirmaram que em qualquer organização o gerenciamento de falhas deve ser tratado de forma especial, mas nem sempre é dada a importância necessária, sendo tratada levando em conta os gastos utilizados para esta área. Aborda o FMEA tradicional e faz uma análise Grey para a identificar possíveis falhas no desenvolvimento da manutenção em um caso específico.

Zhou e Thai (2015) aplicaram a diferenciação dos fatores de risco de ocorrência, severidade e detecção de cada modo de falha por classificações fuzzy e utiliza a Análise Relacional Grey para determinar os rankings dos modos de falha, afirmando que, a aplicação prática da lógica fuzzy e a análise pela Análise Relacional Grey são bastante similares, se utilizando destas duas para a análise no trabalho a fim de auxiliar no aumento da confiabilidade da previsão e esta priorização na classificação das falhas do equipamento pode ser utilizada para uma melhor tomada de decisão em relação ao aspecto de inspeção e manutenção, tornando o sistema mais seguro e confiável, no caso utilizado para melhorar a confiabilidade e segurança no transporte de navios. Afirmam, ainda, que o FMEA possibilita a utilização da Análise Relacional Grey por possuir componentes palpáveis, contáveis, extensíveis e independentes. Afirma, ainda, que o início desta análise foi desenvolvido por Deng (1982), que tratava da tomada de decisões caracterizada por informações incompletas, explorando o comportamento do sistema, utilizando a análise relacional e a construção de modelos.

Li e Chen (2018) afirmaram que a FMEA continua sendo aplicada no domínio da engenharia de confiabilidade, apresentando uma nova FMEA evidencial que integra estrutura, lógica fuzzy e projeção relacional Grey em substituição ao RPN tradicional fornecido pela FMEA. Formula uma nova forma de distribuição de avaliações que aplica a estrutura de convicções difusas para representar as opiniões de especialistas de maneira mais flexível e razoável.

Yazdani *et al.* (2018) propuseram em seu estudo um modelo de suporte à tomada de decisões de múltiplos atributos em uma cadeia de suprimentos a fim de resolver problemas complexos nestas decisões. Apresenta uma plataforma capaz de facilitar o processo da tomada de decisões através da integração de implantação da função de qualidade e da análise relacional Grey, aplicada na cadeia de suprimentos.

Sofyalioğlu e Öztürk (2012) realizaram um estudo com o objetivo de comparar três diferentes métodos de priorização de modos de falhas em um projeto de FMEA: o método tradicional, a análise Grey com pesos iguais para os índices de severidade, detecção e ocorrência e com a utilização da lógica fuzzy para a determinação destes índices, obtendo um resultado mais apurado com o terceiro método, visto que durante as entrevistas para a obtenção dos índices do estudo, os especialistas da área de

qualidade afirmaram que o índice de severidade é muito mais importante em relação aos de detecção e ocorrência, pois este índice pode estar ligado ao fator de risco de vida. Com a utilização da lógica Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process), obtiveram os índices: $\alpha_0 = 0,3527$ (ocorrência), $\alpha_D = 0,2247$ (detecção) e $\alpha_S = 0,4224$ (severidade).

Chang, Wei e Lee (1998) se preocuparam em desenvolver um novo método de análise do modo de falha tradicional da FMEA, a fim de considerar a importância relativa dos fatores, aplicando a lógica fuzzy para realizar a conversão dos fatores e a Análise Relacional Grey, proposta por Deng (1982) para obter o número de prioridade de risco, atribuindo coeficientes de ponderação relativos, garantindo a estabilidade do produto e do processo.

Chang, Liu e Wei (2001) retrataram neste trabalho a utilização da Análise Relacional Grey nos sistemas de controle automotivos para mostrar que a Análise Relacional Grey é muito mais fácil e imparcial do que a FMEA tradicional, podendo aumentar a confiabilidade do produto e a estabilidade do processo, descobrindo problemas potenciais durante as etapas do projeto do produto e do planejamento do processo. Exemplificam, atribuindo os índices propostos por Ben-Daya e Raouf (1996): $\alpha_0 = 0,3$ (ocorrência), $\alpha_D = 0,4$ (detecção) e $\alpha_S = 0,3$ (severidade).

Apesar de terem sido encontrados poucos artigos relacionados à Análise Relacional Grey, eles foram suficientes para servirem como base para a compreensão e aplicação neste estudo.

Nas pesquisas realizadas não foram identificados artigos que aplicaram a utilização da Análise Relacional Grey na formulação e análise de falhas de equipamentos fornecedores de energia de tração elétrica.

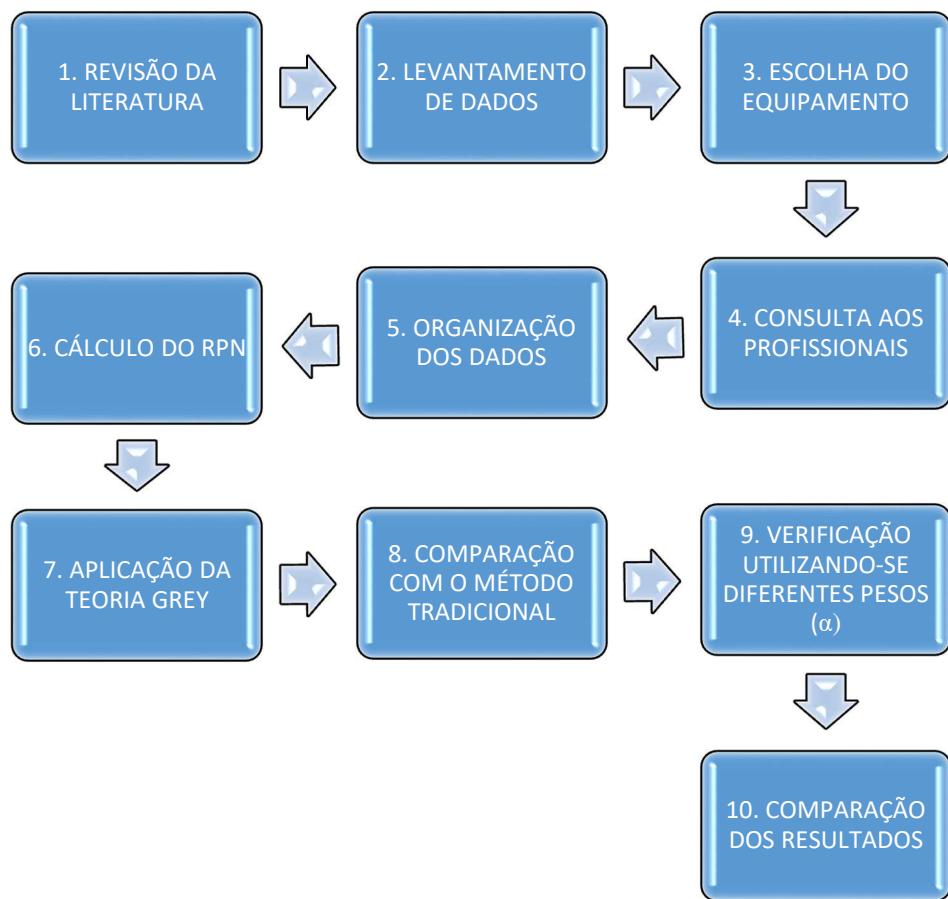
3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo caracteriza-se como sendo uma pesquisa aplicada de natureza exploratória, buscando aprofundar os conceitos de manutenção preventiva e a implantação de uma nova ferramenta para o sistema abordado, utilizando dados práticos adquiridos em um equipamento de utilização no sistema de tração ferroviária (Gerhardt e Silveira, 2009).

3.1. ETAPAS DA PESQUISA

O trabalho foi desenvolvido obedecendo a ordem cronológica apresentada na Figura 5, que demonstra os passos dados até chegar ao resultado final, explicados na sequência:

Figura 5 - Ordem cronológica



Fonte: O autor (2019)

1º Revisão da literatura: Neste estudo foram pesquisados e analisados artigos, dissertações, teses, revistas técnicas, utilizando-se das palavras-chaves, a fim de determinar quais métodos seriam utilizados para analisar o equipamento considerado crítico.

2º Levantamento de dados: Através do banco de dados do centro de informação da manutenção, foram levantadas as falhas de aproximadamente cinco

anos a fim de se realizar esta análise. De posse dos dados coletados, as falhas foram filtradas, de forma a obter as que poderiam ser “evitadas”, caso houvesse uma manutenção preventiva melhor elaborada. Nesta filtragem foram excluídas falhas ocasionadas por atos de vandalismo, intempéries e acidentes.

3º Escolha do equipamento: Diante dos dados filtrados, foi escolhido o equipamento a ser realizado o estudo, levando-se em consideração o número de falhas geradas no período, assim como o domínio que as equipes de manutenção poderiam ter em relação à periodicidade de manutenção deste equipamento, a fim de minimizar a ocorrência de falhas.

4º Consulta aos profissionais: Com o equipamento e o método a ser utilizado definidos, foi realizado um *brainstorming* com 8 (oito) profissionais do setor com experiência de 4 (quatro) a 21 (vinte um) anos na área, avaliando a priorização de cada componente deste equipamento, apontando notas para sua ocorrência, severidade e detecção. Com a formulação do FMEA, foi aplicada a obtenção do RPN pelo método tradicional e pela Análise Relacional Grey, comparando os resultados e reaplicando em campo para verificação e validação.

5º Organização dos dados: Através das médias aritméticas das notas atribuídas pelos profissionais, foi montada uma matriz com os dados coletados.

6º Cálculo do RPN: Foram Calculados os RPNs da matriz anterior para utilização na comparação do ranking gerado.

7º Aplicação da Análise Relacional Grey: Foi realizada a análise relacional Grey, calculando os graus de relação, obtendo-se, assim, a nova sequência de priorização.

8º Comparação com o método tradicional: Foi feita a comparação entre os rankings gerados através da aplicação do método tradicional (RPN) e da Análise Relacional Grey.

9º Verificação, utilizando-se diferentes pesos (α): Foi aplicado o método relacional Grey, utilizando-se diferentes pesos para os coeficientes encontrados na literatura.

10º Comparação dos resultados: Por fim, as diferentes priorizações de risco obtidas foram comparadas.

4. RESULTADOS

4.1. EMPRESA EM ESTUDO

A empresa em estudo possui milhares de usuários que dependem diretamente deste modal para se locomover diariamente, transportando cerca de 3 milhões de passageiros por dia, percorrendo mais de 270 km de extensão, distribuídos por mais de 20 municípios.

4.2. IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Foi realizado o levantamento de falhas durante um período de 5 (cinco) anos entre 2013 e 2017 na empresa em estudo, como pode ser observado na Tabela 4. Esta tabela compreende os principais equipamentos susceptíveis a falhas em uma subestação de energia. Tratam-se de dados reais, levantados para o estudo.

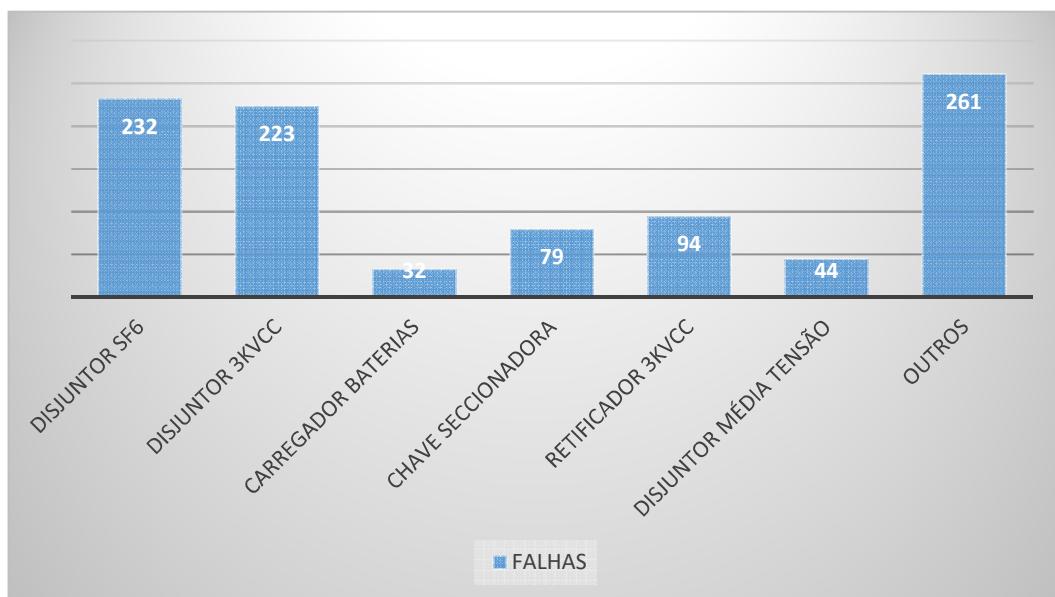
Tabela 4 - Distribuição de falhas nos sistemas

EQUIPAMENTO	FALHAS
DISJUNTOR SF6	232
DISJUNTOR 3KVCC	223
CARREGADOR BATERIAS	32
CHAVE SECCIONADORA	79
RETIFICADOR 3KVCC	94
DISJUNTOR MÉDIA TENSÃO	44
OUTROS	261

Fonte: O autor (2018)

O gráfico apresentado na figura 6 facilita verificar quais componentes apresentaram falhas com maior frequência.

Figura 6- Índice de Falhas



Fonte: O autor

Apesar de o disjuntor SF6 ter apresentado um número de falhas no período analisado sensivelmente maior, este item não foi escolhido devido sua manutenção ser geralmente realizada externamente, optando por analisar o segundo item que mais gerou falhas no período, que foi o disjuntor de 3kVcc, responsável pela alimentação dos circuitos de tração elétrica.

4.3. OBJETO EM ESTUDO

Para este estudo foram utilizados os dados de falhas no disjuntor extra rápido de tração elétrica, responsável pela alimentação elétrica, motivo pelo qual também são conhecidos pelo seu nome em inglês *feeder* (alimentador) e pela proteção dos circuitos elétricos.

4.4.PESQUISA DE PERCEPÇÃO DE RISCO

Foi realizado um *brainstorming* com 8 (oito) profissionais da área entre técnicos, supervisores e engenheiros, com experiências variando de 4 (quatro) a 21 (vinte um) anos, onde cada um expressou seu “*feeling*”, quanto aos dados de causas de falhas dos componentes deste equipamento em estudo, preenchendo uma tabela como

demonstrado na tabela 5. Por não haver consenso quanto à aplicação das notas de prioridades de cada componente do equipamento, foi formulada uma planilha para aquisição individual dos dados. A tabela foi preenchida, considerando a média aritmética dos valores obtidos através da pesquisa de opinião realizada entre os profissionais da área.

Tabela 5 – Pesquisa de Percepção de Risco

PESQUISA DE PERCEPÇÃO DE RISCO

De acordo com sua percepção de risco em relação ao disjuntor extra rápido de tração elétrica, formule uma nota de 1 a 10 para cada item da tabela abaixo para os índices de Ocorrência, Severidade e Detecção de acordo com os critérios apresentados em anexo para:

COMPONENTE	OCORRÊNCIA	SEVERIDADE	DETECÇÃO
Cornetas de sopro			
Peça polar da bobina de sopro			
Contato fixo			
Contato elástico superior			
Braço de contato			
Molas de retorno dos braços de contato			
Alavanca de armadura			
Pacote de lâminas da espira de disparo			
Batente elástico inferior			
Bobina de fechamento			
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo			
Circuito magnético da bobina de fechamento			
Extremidade da alavanca de armadura			
Alavanca de fechamento			
Câmara de arco			
Bobina auxiliar de sopro			
Bobina de sopro			
Tomada de corrente			
Pacote de lâminas de circuito magnético de retenção			
Pacote de lâminas da alavanca de armadura			
Espirá de disparo			
Régua graduada			
Parafuso de afinação			
Bobina de retenção			
Shunt da espira de disparo			
Shunt flexível			
Articulação da alavanca de armadura H			
Articulação do braço de contato F			

4.5. FMEA DO EQUIPAMENTO EM ESTUDO

Primeiramente, a fim de auxiliar nos trabalhos de aplicação das notas e priorização dos componentes do equipamento, a equipe realizou o preenchimento da FMEA, cujos dados seguem nas Tabelas de 6 a 8 com as principais características de cada componente.

A tabela 6 apresenta as principais funções de cada componente analisado:

Tabela 6 - FMEA Disjuntor Alstom JRM – Função

COMPONENTE	FUNÇÃO
Cornetas de sopro	Guiar o arco elétrico
Peça polar da bobina de sopro	Direcionar o arco elétrico
Contato fixo	Passagem da corrente de tração
Contato elástico superior	Passagem da corrente de tração
Braço de contato	Condução do arco elétrico
Molas de retorno dos braços de contato	Retornar o contato móvel na posição inicial
Alavanca de armadura	Possibilitar acionamento manual
Pacote de lâminas da espira de disparo	Ajuste de corrente
Batente elástico inferior	Limitar curso do acionamento
Bobina de fechamento	Fornecer campo magnético para fechar o contato móvel
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	Limitar a corrente de pico
Circuito magnético da bobina de fechamento	Produzir campo magnético para o acionamento do disjuntor
Extremidade da alavanca de armadura	Acoplamento
Alavanca de fechamento	Acionamento manual
Câmara de arco	Conduzir o arco elétrico
Bobina auxiliar de sopro	Guiar o arco elétrico
Bobina de sopro	Guiar o arco elétrico
Tomada de corrente	Entrada dos cabos de comando
Pacote de lâminas de circ. Mag. de retenção	Produzir fluxo magnético
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	Manter o disjuntor armado
Espirais de disparo	Desarmar disjuntor
Régua graduada	Auxiliar na calibração do disjuntor
Parafuso de afinação	Calibração do disjuntor

Bobina de retenção	Manter o disjuntor armado
Shunt da espira de disparo	Calibrar a corrente de disparo
Shunt flexível	Conexão de continuidade da corrente
Articulação da alavanca de armadura H	Possibilitar articulação da alavanca
Articulação do braço de contato F	Possibilitar articulação do braço

Fonte: O autor (2019)

A tabela 7 apresenta qual a avaria comumente encontrada em cada componente:

Tabela 7 - FMEA Disjuntor Alstom JRM - Modo de Falha

COMPONENTE	MODO DE FALHA
Cornetas de sopro	Quebra
Peça polar da bobina de sopro	Quebra
Contato fixo	Desgaste
Contato elástico superior	Desgaste
Braço de contato	Desgaste do carvão
Molas de retorno dos braços de contato	Desajuste
Alavanca de armadura	Quebra
Pacote de lâminas da espira de disparo	Quebra / Desajuste
Batente elástico inferior	Quebra
Bobina de fechamento	Rompimento núcleo
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	Desajuste / quebra
Circuito magnético da bobina de fechamento	Rompimento espiras
Extremidade da alavanca de armadura	Quebra
Alavanca de fechamento	Quebra
Câmara de arco	Quebra / Queima das barreiras
Bobina auxiliar de sopro	Rompimento espiras
Bobina de sopro	Rompimento do núcleo
Tomada de corrente	Quebra
Pacote de lâminas de circuito magnético de retenção	Quebra / desajuste
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	Quebra / desajuste
Espirais de disparo	Rompimento núcleo

Régua graduada	Quebra
Parafuso de afinação	Quebra / Desajuste
Bobina de retenção	Rompimento núcleo
Shunt da espira de disparo	Rompimento
Shunt flexível	Rompimento
Articulação da alavanca de armadura H	Quebra
Articulação do braço de contato F	Quebra

Fonte: O autor (2019)

A tabela 8 apresenta as consequências da falha em cada componente:

Tabela 8 - FMEA Disjuntor Alstom JRM - Efeito Potencial de Falha

COMPONENTE	EFEITO POTENCIAL DE FALHA
Cornetas de sopro	Má condução do arco elétrico
Peça polar da bobina de sopro	Má condução do arco elétrico
Contato fixo	Mau contato
Contato elástico superior	Mau contato
Braço de contato	Deformação
Molas de retorno dos braços de contato	Enfraquecidas
Alavanca de armadura	Demora no fechamento
Pacote de lâminas da espira de disparo	Descalibração
Batente elástico inferior	Suplantar curso dos contatos
Bobina de fechamento	Não opera
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	Não consegue ajuste
Círculo magnético da bobina de fechamento	Não consegue armar o disjuntor
Extremidade da alavanca de armadura	Sem acionamento
Alavanca de fechamento	Sem acionamento
Câmara de arco	Curto-circuito no desarme com pontos metálicos da carcaça
Bobina auxiliar de sopro	Caminho indesejado de passagem do arco elétrico
Bobina de sopro	Caminho indesejado de passagem do arco elétrico
Tomada de corrente	Aquecimento

Pacote de lâminas de circuito magnético de retenção	Não permanece armado
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	Não consegue ajuste
Espira de disparo	Não consegue armar
Régua graduada	Não consegue ajustar
Parafuso de afinação	Não consegue ajustar
Bobina de retenção	Não permanece armado
Shunt da espira de disparo	Não consegue ajuste
Shunt flexível	Não consegue ajuste de corrente
Articulação da alavanca de armadura H	Não consegue mobilidade
Articulação do braço de contato F	Não consegue mobilidade

Fonte: O autor (2019)

A tabela 9 apresenta as principais ações recomendadas nas manutenções preventivas:

Tabela 9 - FMEA Disjuntor Alstom JRM - Ação Recomendada

COMPONENTE	AÇÃO RECOMENDADA
Cornetas de sopro	Limpeza / inspeção / substituição
Peça polar da bobina de sopro	Limpeza / inspeção / substituição
Contato fixo	Limpeza / inspeção / substituição
Contato elástico superior	Limpeza / inspeção / substituição
Braço de contato	Inspeção / substituição
Molas de retorno dos braços de contato	Inspeção / substituição
Alavanca de armadura	Inspeção / substituição
Pacote de lâminas da espira de disparo	Inspeção / ajuste / substituição
Batente elástico inferior	Limpeza / inspeção / substituição
Bobina de fechamento	Inspeção / substituição
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	Inspeção / ajuste / substituição
Circuito magnético da bobina de fechamento	Inspeção / ajuste / substituição
Extremidade da alavanca de armadura	Inspeção / substituição
Alavanca de fechamento	Inspeção / substituição
Câmara de arco	Limpeza / raspagem / inspeção / substituição
Bobina auxiliar de sopro	Inspeção / substituição

Bobina de sopro	Inspeção / substituição
Tomada de corrente	Inspeção / substituição
Pacote de lâminas de circuito magnético de retenção	Inspeção / ajuste / substituição
Pacote de lâminas de a alavanca de armadura	Inspeção / ajuste / substituição
Espira de disparo	Inspeção / substituição
Régua graduada	Limpeza / inspeção / substituição
Parafuso de afinação	Limpeza / inspeção / ajuste / substituição
Bobina de retenção	Inspeção / substituição
Shunt da espira de disparo	Inspeção / ajuste / substituição
Shunt flexível	Inspeção / ajuste / substituição
Articulação da alavanca de armadura H	Limpeza / inspeção / substituição
Articulação do braço de contato F	Limpeza / inspeção / substituição

Fonte: O autor (2019)

4.5.1. FORMULAÇÃO DO RPN

A tabela 10 apresenta os resultados obtidos das médias aritméticas das notas atribuídas pelos profissionais do setor para os índices de ocorrência, severidade e detecção, de acordo com cada percepção.

A aplicação destas notas evidencia a visão com que os profissionais possuem sobre as necessidades de cada componente, pois atuam diretamente na manutenção destes equipamentos.

Tabela 10 – Médias das notas atribuídas

COMPONENTE	OCORRÊNCIA	SEVERIDADE	DETECÇÃO
Cornetas de sopro	1,4	8,8	3,8
Peça polar da bobina de sopro	1,4	8,6	4,0
Contato fixo	3,8	8,0	5,8
Contato elástico superior	3,8	8,0	6,0
Braço de contato	1,8	5,2	5,0
Molas de retorno dos braços de contato	2,2	5,4	6,0
Alavanca de armadura	1,2	5,2	5,6
Pacote de lâminas da espira de disparo	1,2	4,2	5,6
Batente elástico inferior	1,0	4,2	5,6
Bobina de fechamento	5,2	7,6	4,6

Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	1,0	3,8	2,8
Círculo magnético da bobina de fechamento	3,8	4,8	3,8
Extremidade da alavanca de armadura	1,4	3,8	5,2
Alavanca de fechamento	1,2	1,8	3,2
Câmara de arco	5,2	8,6	6,0
Bobina auxiliar de sopro	3,0	8,6	5,0
Bobina de sopro	3,6	8,8	5,0
Tomada de corrente	1,0	6,8	5,4
Pacote de lâminas de circuito magnético de retenção	1,2	6,6	4,6
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	1,0	7,2	4,6
Espirais de disparo	1,0	6,4	5,4
Régua graduada	1,0	1,4	7,2
Parafuso de afinação	1,8	4,6	5,6
Bobina de retenção	4,0	8,4	4,8
Shunt da espira de disparo	1,0	4,2	5,0
Shunt flexível	1,0	2,8	3,8
Articulação da alavanca de armadura H	1,0	2,6	4,0
Articulação do braço de contato F	1,0	2,6	4,4

Fonte: O autor (2019)

Pela tabela 10 pode-se observar que as maiores notas atribuídas para o atributo ocorrência foram para a câmara de arco e a bobina de fechamento, ou seja: são os itens que mais apresentam falhas segundo os especialistas.

Para o atributo severidade, o conjunto de sopro magnético (corneta e bobina de sopro) recebeu a maior nota, visto que uma falha nestes componentes pode levar a um direcionamento incorreto do arco voltaico formado nas aberturas do *feeder*, com consequências catastróficas ao equipamento, algumas vezes até causando sua perda, sem possibilidade de reparo (destruição total), visto os altos níveis de correntes de rupturas a que estes equipamentos estão sujeitos.

Verifica-se uma elevada nota atribuída para o atributo detecção para a régua graduada devido a sua facilidade na detecção de falhas, por estar totalmente exposta.

Utilizando-se a equação 3 obtém-se o RPN, onde também pode-se verificar a posição de cada item no ranking de prioridades na tabela 11.

Tabela 11 – RPN calculado

COMPONENTE	RPN TRAD.
Cornetas de sopro	46,8
Peça polar da bobina de sopro	48,2
Contato fixo	176,3
Contato elástico superior	182,4
Braço de contato	46,8
Molas de retorno dos braços de contato	71,3
Alavanca de armadura	34,9
Pacote de lâminas da espira de disparo	28,2
Batente elástico inferior	23,5
Bobina de fechamento	181,8
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	10,6
Círculo magnético da bobina de fechamento	69,3
Extremidade da alavanca de armadura	27,7
Alavanca de fechamento	6,9
Câmara de arco	268,3
Bobina auxiliar de sopro	129,0
Bobina de sopro	158,4
Tomada de corrente	36,7
Pacote de lâminas de círculo magnético de retenção	36,4
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	33,1
Espirais de disparo	34,6
Régua graduada	10,1
Parafuso de afinação	46,4
Bobina de retenção	161,3
Shunt da espira de disparo	21,0
Shunt flexível	10,6
Articulação da alavanca de armadura H	10,4
Articulação do braço de contato F	11,4

Fonte: O autor (2019)

A fim de facilitar o entendimento e as necessidades de priorização de cada item analisado, pode-se gerar um ranking para o estudo, onde quanto maior for o RPN, mais prioritário deverá ser tratado o item, elevando sua posição no ranking, conforme verificado na tabela 12.

Tabela 12 – Ranking gerado pelo RPN

COMPONENTE	RPN TRAD.	RANKING
Câmara de arco	268,3	1
Contato elástico superior	182,4	2
Bobina de fechamento	181,8	3
Contato fixo	176,3	4
Bobina de retenção	161,3	5
Bobina de sopro	158,4	6
Bobina auxiliar de sopro	129,0	7
Molas de retorno dos braços de contato	71,3	8
Círculo magnético da bobina de fechamento	69,3	9
Peça polar da bobina de sopro	48,2	10
Cornetas de sopro	46,8	11
Braço de contato	46,8	12
Parafuso de afinação	46,4	13
Tomada de corrente	36,7	14
Pacote de lâminas de circuito magnético de retenção	36,4	15
Alavanca de armadura	34,9	16
Espira de disparo	34,6	17
Pacote de lâminas de alavanca de armadura	33,1	18
Pacote de lâminas da espira de disparo	28,2	19
Extremidade da alavanca de armadura	27,7	20
Batente elástico inferior	23,5	21
Shunt da espira de disparo	21,0	22
Articulação do braço de contato F	11,4	23
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	10,6	24
Shunt flexível	10,6	24
Articulação da alavanca de armadura H	10,4	26
Régua graduada	10,1	27
Alavanca de fechamento	6,9	28

Fonte: O autor (2019)

4.5.2. APLICAÇÃO DA ANÁLISE RELACIONAL GREY

1º Estabelecendo a série comparativa: Através das médias das notas atribuídas pelos profissionais do setor foi montada a matriz 4:

X =	[1,4	8,8	3,8]
		1,4	8,6	4,0	
		3,8	8,0	5,8	
		3,8	8,0	6,0	
		1,8	5,2	5,0	
		2,2	5,4	6,0	
		1,2	5,2	5,6	
		1,2	4,2	5,6	
		1,0	4,2	5,6	
		5,2	7,6	4,6	
		1,0	3,8	2,8	
		3,8	4,8	3,8	
		1,4	3,8	5,2	
		1,2	1,8	3,2	
		5,2	8,6	6,0	
		3,0	8,6	5,0	
		3,6	8,8	5,0	
		1,0	6,8	5,4	
		1,2	6,6	4,6	
		1,0	7,2	4,6	
		1,0	6,4	5,4	
		1,0	1,4	7,2	
		1,8	4,6	5,6	
		4,0	8,4	4,8	
		1,0	4,2	5,0	
		1,0	2,8	3,8	
		1,0	2,6	4,0	
		1,0	2,6	4,4	

(Matriz 4)

2º Estabelecendo a série padrão: Desenvolvida através do menor valor encontrado na série comparativa:

$$X_0 = \begin{bmatrix} & 1,0 & 1,0 & 1,0 & \end{bmatrix}$$

(Matriz 5)

3º Calculando-se a diferença entre a série comparativa e a série padrão:

$$D = \begin{bmatrix} 0,4 & 7,8 & 2,8 \\ 0,4 & 7,6 & 3,0 \\ 2,8 & 7,0 & 4,8 \\ 2,8 & 7,0 & 5,0 \\ 0,8 & 4,2 & 4,0 \\ 1,2 & 4,4 & 5,0 \\ 0,2 & 4,2 & 4,6 \\ 0,2 & 3,2 & 4,6 \\ 0,0 & 3,2 & 4,6 \\ 4,2 & 6,6 & 3,6 \\ 0,0 & 2,8 & 1,8 \\ 2,8 & 3,8 & 2,8 \\ 0,4 & 2,8 & 4,2 \\ 0,2 & 0,8 & 2,2 \\ 4,2 & 7,6 & 5,0 \\ 2,0 & 7,6 & 4,0 \\ 2,6 & 7,8 & 4,0 \\ 0,0 & 5,8 & 4,4 \\ 0,2 & 5,6 & 3,6 \\ 0,0 & 6,2 & 3,6 \\ 0,0 & 5,4 & 4,4 \\ 0,0 & 0,4 & 6,2 \\ 0,8 & 3,6 & 4,6 \\ 3,0 & 7,4 & 3,8 \\ 0,0 & 3,2 & 4,0 \\ 0,0 & 1,8 & 2,8 \\ 0,0 & 1,6 & 3,0 \\ 0,0 & 1,6 & 3,4 \end{bmatrix}$$

(Matriz 6)

4º Obtendo os coeficientes de relação: Adotando-se o indicador $\xi = 0,5$ (Chang *et al.* (2001); Sofyalioğlu & Öztürk (2012); Roos & Rosa (2008)):

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0,9 & 0,3 & 0,6 \\ 0,9 & 0,3 & 0,6 \\ 0,6 & 0,4 & 0,4 \\ 0,6 & 0,4 & 0,4 \\ 0,8 & 0,5 & 0,5 \\ 0,8 & 0,5 & 0,4 \\ 1,0 & 0,5 & 0,5 \\ 1,0 & 0,5 & 0,5 \\ 1,0 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,4 & 0,5 \\ 1,0 & 0,6 & 0,7 \\ 0,6 & 0,5 & 0,6 \\ 0,9 & 0,6 & 0,5 \\ 1,0 & 0,8 & 0,6 \\ 0,5 & 0,3 & 0,4 \\ 0,7 & 0,3 & 0,5 \\ 0,6 & 0,3 & 0,5 \\ 1,0 & 0,4 & 0,5 \\ 1,0 & 0,4 & 0,5 \\ 1,0 & 0,4 & 0,5 \\ 1,0 & 0,9 & 0,4 \\ 0,8 & 0,5 & 0,5 \\ 0,6 & 0,3 & 0,5 \\ 1,0 & 0,5 & 0,5 \\ 1,0 & 0,7 & 0,6 \\ 1,0 & 0,7 & 0,6 \\ 1,0 & 0,7 & 0,5 \end{bmatrix}$$

(Matriz 7)

5º Determinando-se o grau de relação

➤ Proposta apresentada por Roos & Rosa (2008)

Os índices propostos por Roos & Rosa convergem em uma distribuição igualitária dos fatores:

- $\alpha_o = 33,3\%$ (ocorrência)
- $\alpha_s = 33,3\%$ (severidade)
- $\alpha_D = 33,3\%$ (detecção).

De posse dos pesos relativos (α) aos fatores de ocorrência, detecção e severidade, a tabela 12 apresenta o grau de relação (C_i) de cada componente através da equação 7.

Tabela 13 - Grau de relação com índices propostos por Roos e Rosa (2008)

COMPONENTE	GRAU DE RELAÇÃO
Cornetas de sopro	0,607
Peça polar da bobina de sopro	0,604
Contato fixo	0,463
Contato elástico superior	0,459
Braço de contato	0,602
Molas de retorno dos braços de contato	0,558
Alavanca de armadura	0,631
Pacote de lâminas da espira de disparo	0,653
Batente elástico inferior	0,669
Bobina de fechamento	0,458
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	0,755
Círculo magnético da bobina de fechamento	0,557
Extremidade da alavanca de armadura	0,657
Alavanca de fechamento	0,807
Câmara de arco	0,420
Bobina auxiliar de sopro	0,498
Bobina de sopro	0,476
Tomada de corrente	0,624
Pacote de lâminas de círculo magnético de retenção	0,627
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	0,635
Espirais de disparo	0,630
Régua graduada	0,764

Parafuso de afinação	0,603
Bobina de retenção	0,472
Shunt da espira de disparo	0,681
Shunt flexível	0,755
Articulação da alavanca de armadura H	0,758
Articulação do braço de contato F	0,748

Fonte: O autor (2019)

6º Ranqueando as prioridades de risco

Ordenando-se através do grau de relação, a tabela 13 apresenta o ranking gerado pela Análise Relacional Grey com os índices propostos por Roos & Rosa (2008):

Tabela 14 - Ranking com os índices de Roos e Rosa (2008)

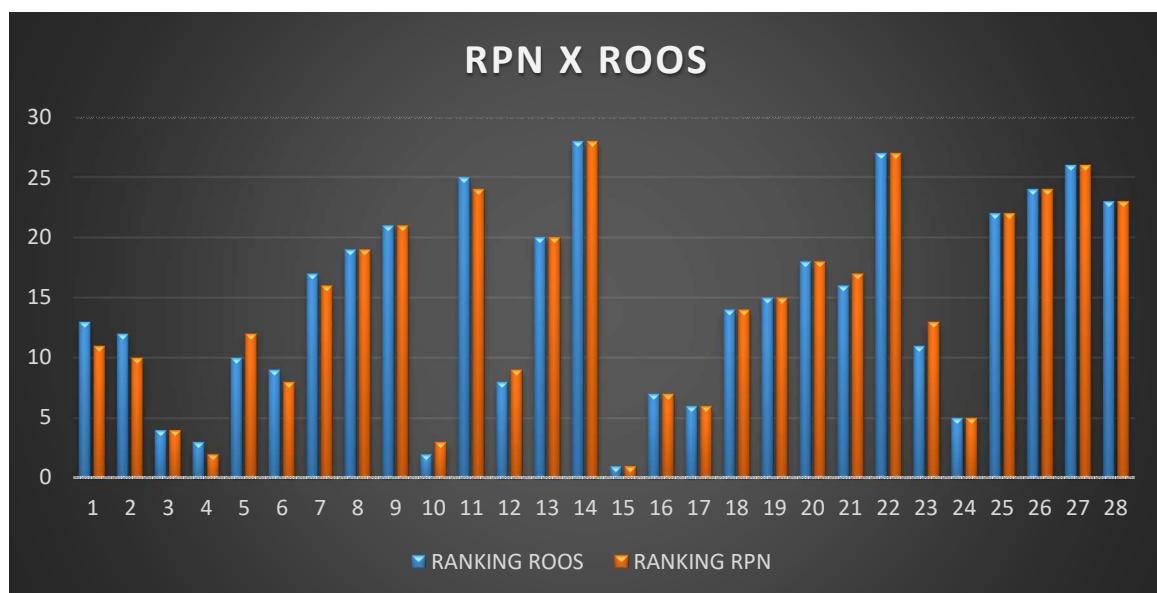
COMPONENTE	GRAU DE RELAÇÃO	RANKING ROOS
Câmara de arco	0,420	1
Bobina de fechamento	0,458	2
Contato elástico superior	0,459	3
Contato fixo	0,463	4
Bobina de retenção	0,472	5
Bobina de sopro	0,476	6
Bobina auxiliar de sopro	0,498	7
Círculo magnético da bobina de fechamento	0,557	8
Molas de retorno dos braços de contato	0,558	9
Braço de contato	0,602	10
Parafuso de afinação	0,603	11
Peça polar da bobina de sopro	0,604	12
Cornetas de sopro	0,607	13
Tomada de corrente	0,624	14
Pacote de lâminas de círculo magnético de retenção	0,627	15
Espira de disparo	0,630	16
Alavanca de armadura	0,631	17
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	0,635	18
Pacote de lâminas da espira de disparo	0,653	19
Extremidade da alavanca de armadura	0,657	20
Batente elástico inferior	0,669	21

Shunt da espira de disparo	0,681	22
Articulação do braço de contato F	0,748	23
Shunt flexível	0,755	24
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	0,755	25
Articulação da alavanca de armadura H	0,758	26
Régua graduada	0,764	27
Alavanca de fechamento	0,807	28

Fonte: O autor (2019)

Mesmo com os índices iguais para α_0 , α_D e α_S (1/3), verifica-se a ocorrência de algumas variações no comparativo do ranking de prioridade, conforme pode-se observar na figura 7, em que a linha azul representa o comportamento da curva característica levantada com os dados do RPN e a laranja com os dados gerados pela análise relacional Grey. Na prática, significa que ocorreu alterações em algumas prioridades de forma bastante sutil.

Figura 7 – Comparativo RPN x Roos e Rosa (1/3 para cada índice)



➤ Proposta apresentada por Chang *et al.* (2001)

A tabela 14 apresenta os valores quando aplicados os índices propostos por Chang *et al.* (2001), assim como sugerido por Bem-Daya & Raouf (1996):

- $\alpha_0 = 30,0\%$ (ocorrência)
- $\alpha_s = 30,0\%$ (severidade)
- $\alpha_D = 40,0\%$ (detecção).

Tabela 15 - Grau de relação com dados propostos por Chang *et al.* (2001)

COMPONENTE	GRAU DE RELAÇÃO
Cornetas de sopro	0,605
Peça polar da bobina de sopro	0,600
Contato fixo	0,461
Contato elástico superior	0,457
Braço de contato	0,591
Molas de retorno dos braços de contato	0,546
Alavanca de armadura	0,613
Pacote de lâminas da espira de disparo	0,634
Batente elástico inferior	0,648
Bobina de fechamento	0,464
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	0,748
Circuito magnético da bobina de fechamento	0,559
Extremidade da alavanca de armadura	0,639
Alavanca de fechamento	0,790
Câmara de arco	0,421
Bobina auxiliar de sopro	0,498
Bobina de sopro	0,477
Tomada de corrente	0,609
Pacote de lâminas de circuito magnético de retenção	0,617
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	0,624
Espirais de disparo	0,614
Régua graduada	0,727
Parafuso de afinação	0,588
Bobina de retenção	0,476
Shunt da espira de disparo	0,662
Shunt flexível	0,738
Articulação da alavanca de armadura H	0,739
Articulação do braço de contato F	0,726

Fonte: O autor (2019)

6º Ranqueando as prioridades de risco: Ordenando-se através do grau de relação, obtém-se o ranking gerado pela Análise Relacional Grey (tabela 15) com os índices propostos por Ben-Daya and Raouf (1996) e Chang *et al.* (2001):

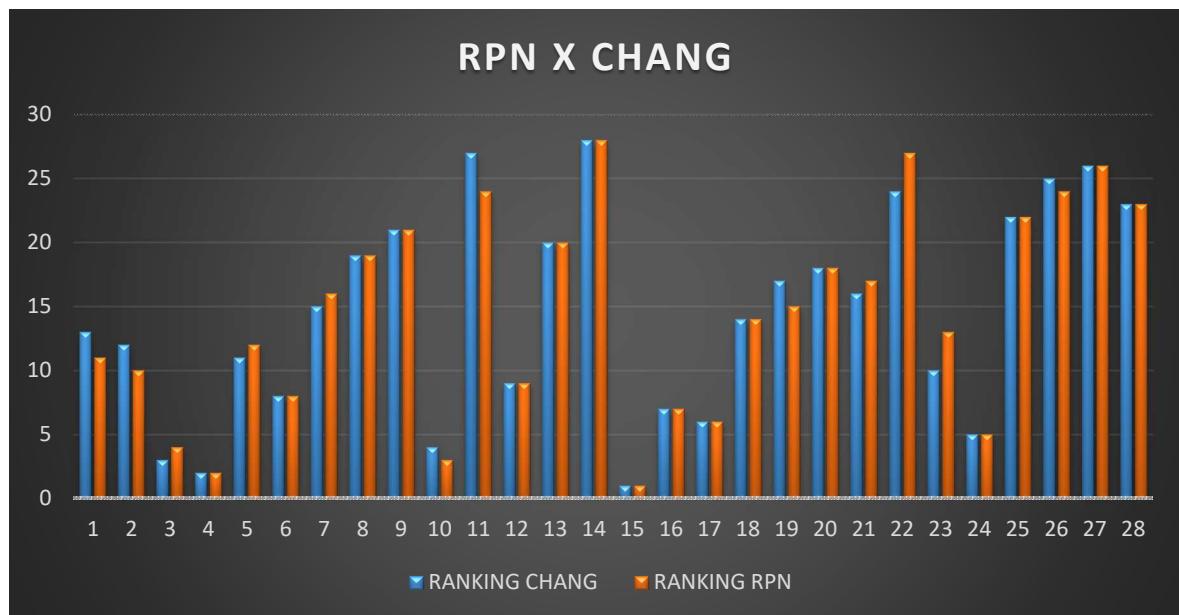
Tabela 16 - Ranking com índices propostos por Chang *et al.* (2001)

COMPONENTE	GRAU DE RELAÇÃO	RANKING
Câmara de arco	0,421	1
Contato elástico superior	0,457	2
Contato fixo	0,461	3
Bobina de fechamento	0,464	4
Bobina de retenção	0,476	5
Bobina de sopro	0,477	6
Bobina auxiliar de sopro	0,498	7
Molas de retorno dos braços de contato	0,546	8
Circuito magnético da bobina de fechamento	0,559	9
Parafuso de afinação	0,588	10
Braço de contato	0,591	11
Peça polar da bobina de sopro	0,600	12
Cornetas de sopro	0,605	13
Tomada de corrente	0,609	14
Alavanca de armadura	0,613	15
Espira de disparo	0,614	16
Pacote de lâminas de circuito magnético de retenção	0,617	17
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	0,624	18
Pacote de lâminas da espira de disparo	0,634	19
Extremidade da alavanca de armadura	0,639	20
Batente elástico inferior	0,648	21
Shunt da espira de disparo	0,662	22
Articulação do braço de contato F	0,726	23
Régua graduada	0,727	24
Shunt flexível	0,738	25
Articulação da alavanca de armadura H	0,739	26
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	0,748	27
Alavanca de fechamento	0,790	28

Fonte: O autor (2019)

Agora, conforme observa-se na figura 8 apesar da diferença entre as curvas ainda sofrerem variações sutis, percebe-se algumas alterações nas ordens dos componentes.

Figura 8 – Comparativo RPN x Chang



➤ **Proposta apresentada por Leal *et al.* (2006)**

Também foram utilizados os índices propostos por Leal *et al.* (2006), cujos graus de relação seguem na tabela 16.

$\alpha_0 = 30,0\%$ (ocorrência);

$\alpha_s = 50,0\%$ (severidade);

$\alpha_D = 20,0\%$ (detecção).

Tabela 17 - Grau de relação com dados propostos por Leal *et al.* (2006)

COMPONENTE	GRAU DE RELAÇÃO
Cornetas de sopro	0,555
Peça polar da bobina de sopro	0,555
Contato fixo	0,443
Contato elástico superior	0,441
Braço de contato	0,588
Molas de retorno dos braços de contato	0,552
Alavanca de armadura	0,618
Pacote de lâminas da espira de disparo	0,652
Batente elástico inferior	0,666
Bobina de fechamento	0,434
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	0,728
Círculo magnético da bobina de fechamento	0,544
Extremidade da alavanca de armadura	0,659
Alavanca de fechamento	0,828
Câmara de arco	0,402
Bobina auxiliar de sopro	0,467
Bobina de sopro	0,445
Tomada de corrente	0,595
Pacote de lâminas de círculo magnético de retenção	0,595
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	0,597
Espirais de disparo	0,604
Régua graduada	0,831
Parafuso de afinação	0,601
Bobina de retenção	0,443
Shunt da espira de disparo	0,673
Shunt flexível	0,759
Articulação da alavanca de armadura H	0,768
Articulação do braço de contato F	0,761

Fonte: O autor (2019)

Ordenando-se através do grau de relação, obtém-se o ranking gerado pela Análise Relacional Grey (tabela 17) com os índices propostos por Leal *et al.* (2006):

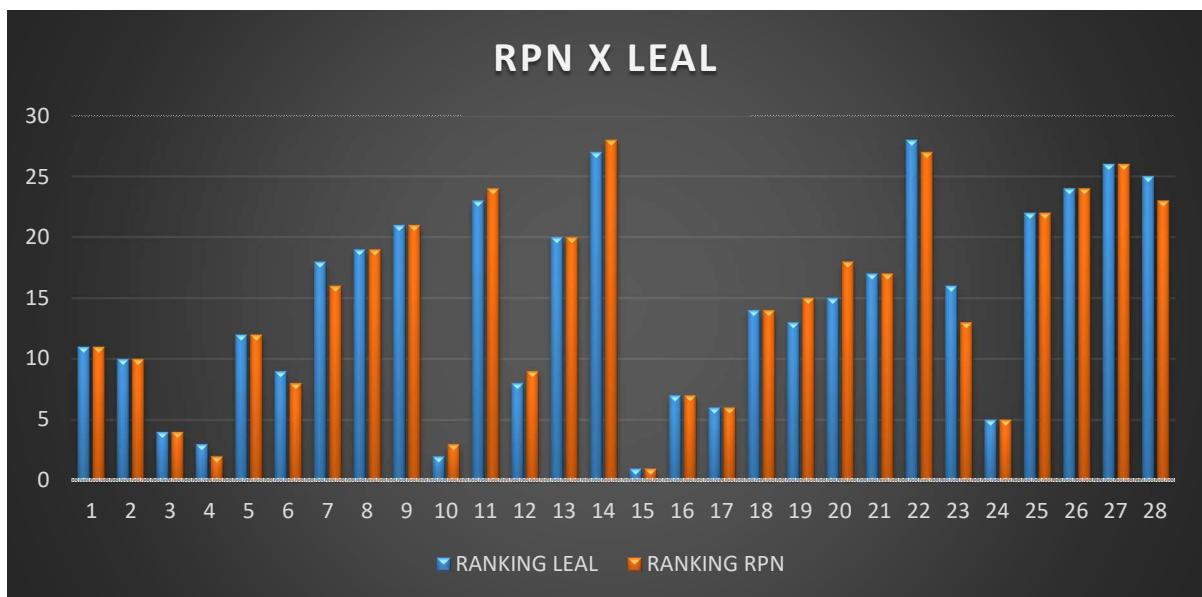
Tabela 18 - Ranking obtidos com coeficientes propostos (Leal *et al.* 2006)

COMPONENTE	GRAU DE RELAÇÃO	RANKING
Câmara de arco	0,402	1
Bobina de fechamento	0,434	2
Contato elástico superior	0,441	3
Contato fixo	0,443	4
Bobina de retenção	0,443	5
Bobina de sopro	0,445	6
Bobina auxiliar de sopro	0,467	7
Círculo magnético da bobina de fechamento	0,544	8
Molas de retorno dos braços de contato	0,552	9
Peça polar da bobina de sopro	0,555	10
Cornetas de sopro	0,555	11
Braço de contato	0,588	12
Pacote de lâminas de círculo magnético de retenção	0,595	13
Tomada de corrente	0,595	14
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	0,597	15
Parafuso de afinação	0,601	16
Espira de disparo	0,604	17
Alavanca de armadura	0,618	18
Pacote de lâminas da espira de disparo	0,652	19
Extremidade da alavanca de armadura	0,659	20
Batente elástico inferior	0,666	21
Shunt da espira de disparo	0,673	22
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	0,728	23
Shunt flexível	0,759	24
Articulação do braço de contato F	0,761	25
Articulação da alavanca de armadura H	0,768	26
Alavanca de fechamento	0,828	27
Régua graduada	0,831	28

Fonte: O autor (2019)

Mesmo inserindo o maior índice para o quesito “severidade”, conforme pode-se verificar na figura 9, houve uma leve diferença quando tomado como referência os dados gerados pelo RPN.

Figura 9 - Comparativo RPN x Leal *et al.* (2006)



5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Realizando uma análise com base nos dados obtidos pelo RPN, pode-se observar que a Análise Relacional Grey se mostrou bastante coerente com a realidade, apresentando uma sutil diferença no ranking (tabela 18) e, consequentemente, na priorização das atividades de manutenção preventiva em campo:

Tabela 19 - Quadro comparativo do Ranking

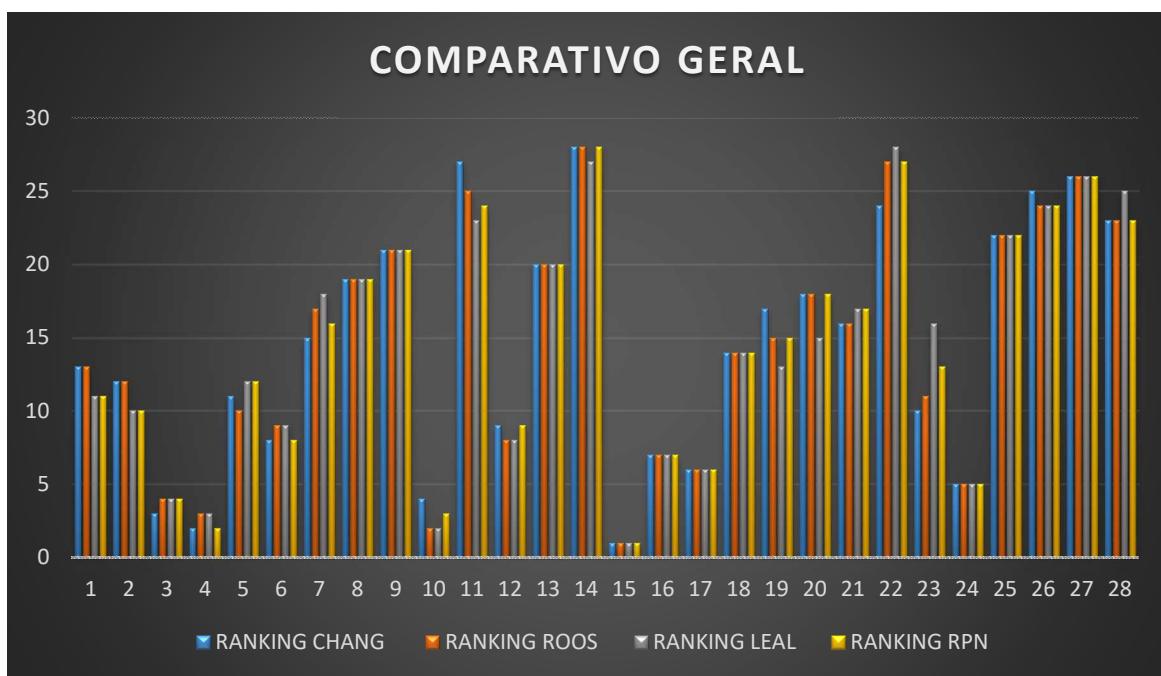
COMPONENTE	RANKING RPN	RANKING CHANG	RANKING ROOS	RANKING LEAL
Cornetas de sopro	11	13	13	11
Peça polar da bobina de sopro	10	12	12	10
Contato fixo	4	3	4	4
Contato elástico superior	2	2	3	3
Braço de contato	12	11	10	12
Molas de retorno dos braços de contato	8	8	9	9
Alavanca de armadura	16	15	17	18
Pacote de lâminas da espira de disparo	19	19	19	19
Batente elástico inferior	21	21	21	21
Bobina de fechamento	3	4	2	2
Pacote de lâminas shunt da espira de disparo	24	27	25	23
Círculo magnético da bobina de fechamento	9	9	8	8
Extremidade da alavanca de armadura	20	20	20	20
Alavanca de fechamento	28	28	28	27
Câmara de arco	1	1	1	1
Bobina auxiliar de sopro	7	7	7	7
Bobina de sopro	6	6	6	6
Tomada de corrente	14	14	14	14
Pacote de lâminas de círculo magnético de retenção	15	17	15	13
Pacote de lâminas da alavanca de armadura	18	18	18	15
Espirais de disparo	17	16	16	17
Régua graduada	27	24	27	28
Parafuso de afinação	13	10	11	16

Bobina de retenção	5	5	5	5
Shunt da espira de disparo	22	22	22	22
Shunt flexível	24	25	24	24
Articulação da alavancas de armadura H	26	26	26	26
Articulação do braço de contato F	23	23	23	25

Fonte: O autor (2019)

Pelo gráfico da figura 10 observa-se que a aplicação da Análise Relacional Grey apresentou resultados bastante coerentes quando comparados aos dados obtidos pelo RPN tradicional, se tornando uma ferramenta excelente para esta aplicação.

Figura 10 – Comparativo Geral



Deve-se considerar que esta priorização pode ser interpretada como sendo a necessidade de dar atenção a um item mais prioritário a ser verificado que outro, de uma forma mais minuciosa ou até mesmo, com a criação de um procedimento de manutenção específico para um certo quantitativo de itens que se destacam na tabela, parecido com uma análise do diagrama de Pareto, por exemplo. Esta verificação mais minuciosa ou com uma menor periodicidade tende a diminuir o número de ocorrências

registradas neste determinado componente, sendo o ideal uma intervenção neste equipamento antes da ocorrência de uma falha.

6. CONCLUSÕES

Através da literatura consultada pode-se observar a preocupação dos autores em propor melhorias na aplicação da FMEA tradicional, visto que este pode retratar resultados de priorização divergentes com a realidade, pois podemos ter diferentes percepções para os níveis de severidade, detecção e ocorrência, de acordo com o sistema em estudo. Alguns autores sugeriram a utilização da Análise Relacional Grey para realizar esta compensação estudada e, após formular o ranking de prioridades, aplicou mais uma vez a FMEA a fim de apurar as principais causas das falhas verificadas.

Neste estudo em questão, em termos gerais, a diferença entre os resultados obtidos através do RPN foram muito parecidos com os extraídos pela Análise Relacional Grey, nos três diferentes conjuntos de as inseridos, o que poderia ser diferente para outros sistemas.

Em formas gerais, para este caso específico, a Análise Relacional Grey gerou resultados bastante coerentes quando comparados com o método RPN tradicional, obtendo-se resultados mais apurados, proporcionando um “ajuste fino”, visto que, à medida que se inseriu índices distintos para ocorrência, detecção e severidade, os resultados sofreram alterações.

A aplicação da FMEA auxiliou muito nos trabalhos de identificação dos componentes, assim como a discussão quanto a sua utilidade dentro do equipamento. Auxiliou até para a formulação das notas atribuídas para o cálculo do RPN e as bases para a aplicação da Análise Relacional Grey.

Em relação à Pergunta de Pesquisa: “A aplicação da Análise Relacional Grey como ferramenta de priorização no atendimento da manutenção preventiva ou preditiva é mais adequada que o uso do RPN tradicional?”. Pode-se afirmar que, tomando como exemplo este equipamento analisado, os resultados obtidos com a aplicação da Análise Relacional Grey foram bem satisfatórios para a realização da análise, muito similares aos obtidos pelo RPN tradicional, demonstrando-se que a ferramenta funciona de forma confiável, apresentando resultados mais apurados.

Esta cultura de formulação do FMEA deve ser estendida para outros setores e

equipamentos da empresa em estudo, assim como a aplicação da Análise Relacional Grey.

7. CONTRIBUIÇÕES DE PESQUISA

➤ ACADÊMICO

Este estudo propicia a oportunidade de conhecer detalhadamente os passos para a implementação da Análise Relacional Grey, assim como possibilita uma fácil compreensão do sistema elétrico de potência voltado para os sistemas de tração elétrica e das principais ferramentas de gestão.

➤ NA PRÁTICA

A implementação destas ferramentas apresentadas na manutenção do sistema elétrico de potência deverá minimizar consideravelmente o número de falhas, visto que permitirá “atacar” os sistemas de acordo com as prioridades de atendimento geradas, evitando realizar atuações desnecessárias ou que poderiam ser postergadas.

8. LIMITAÇÕES DE PESQUISA

Devido ao reduzido número de artigos sobre o assunto, ainda não foi possível especificar em qual sistema a utilização da Análise Relacional Grey trará resultados mais apropriados para o planejamento de manutenção preventiva em relação ao RPN tradicional.

Caso fosse possível a obtenção de dados estatísticos reais de outro equipamento, poderia ser realizada uma comparação entre os resultados.

9. PROPOSTAS FUTURAS

Esta Análise Relacional Grey pode ser utilizada para vários outros segmentos, como para a análise de falhas de outros equipamentos ou, inclusive, para o estudo de priorização de projetos, pois poderá fornecer e elucidar as verdadeiras questões a serem priorizadas com a liberdade de inserção dos diferentes índices, que forem coerentes com cada aplicação.

Este estudo deverá ser aplicado a outros equipamentos da Empresa em estudo, pois possibilita focar nos sistemas mais críticos necessários para evitar a necessidade de intervenção da manutenção corretiva, visto que os Departamentos tendem a diminuir o número de empregados para atender as manutenções preventivas, minimizando custos e a otimização de recursos.

10.REFERÊNCIAS

ALIMOHAMMADI, Iraj e ADL, Javad. 2013. The study of Influencing Maintenance Factors on Failures of Two gypsum Kilns by Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). *Iranian Journal of Health, Safety & Environment*. Março de 2013, pp. 89-94.

Aplicação da ferramenta fmea: estudo de caso em uma empresa do setor de transporte de passageiros. ROOS, C., et al. 2007. 2, Santa Cruz do Sul : s.n., Janeiro/Junho de 2007, TECNOLÓGICA, Vol. 11, pp. 29-32.

APLICADA, Instituto de Pesquisa Econômica. <http://www.ipea.gov.br>. IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. [Online]

BEN-DAYA, M. e RAOUF, Abdul. 1996. A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 1996, pp. 43-47.

BESTERFIELD, M. 2003. Assessing engineering students' abilities to resolve ethical dilemmas. *Frontiers in Education*. 2003.

BRAGANÇA, H. M. D. S. 2013. *Implementação da Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos no processo de fabricação de peças em material compósito*. Lisboa : s.n., 2013.

BRAGANÇA, Hedolânia Madre de Deus Sequeira. 2013. *Implementação da Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos no processo de fabricação de peças em material compósito*. Faculdade de ciência e tecnologia. Lisboa : s.n., 2013.

BRASIL, ENEL. 2018. LIG AT - Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão de Subtransmissão. <https://www.eneldistribuicaosp.com.br/normas-tecnicas>. [Online] 26 de 02 de 2018. <https://www.eneldistribuicaosp.com.br/normas-tecnicas>.

BULL, D.R. et al. 1995. Approaches to Automated FMEA of Hydraulic Systems. *In Proceedings of the Aerotech 95 Conference*. Outubro de 1995.

BULL, D.R., et al. 1995. Approaches to Automated FMEA of Hydraulic Systems. *In Proceedings of the Aerotech 95 Conference*. 1995.

CASTRO, V. C. 2011. *Aplicação do modelo de previsão Grey GM (1, 1) para previsão de vendas no segmento de automóveis sedans pequenos*. Rio de Janeiro :

s.n., 2011.

CASTRO, Vitor Gomes de. 2011. *Aplicação do modelo de previsão Grey GM (1, 1) para previsão de vendas no segmento de automóveis sedans pequenos.* Rio de Janeiro : s.n., 2011. p. 44.

CHANAMOOL, Nalinee e NAENNA, Thanakorn. Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department.

CHANG, Ching Liang, WEI, Chiu Chi e LEE, Yeong Hoang. 1999. Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. *Kybernetes*. 1999, Vol. 28, pp. 1072-1080.,

Como as cidades podem favorecer ou dificultar a promoção da saúde de seus moradores? **FAJERSTAJN, Laís, Veras, Mariana e Saldiva, Hilário.** 2016. São Paulo : s.n., 2016.

CORSSEN, Carlos Larraín. 1979. Avaliação de índices de confiabilidade em subestações. 1979, p. 286.

DENG, Ju-Long. 1982. Control problems of grey systems. *SYSTEMS & CONTROL LETTERS*. Março de 1982, pp. 288-294.

DUNN, B. 2005. *Microarray karyotyping of commercial wine yeast strains reveals shared, as well as unique, genomic signatures.* 2005.

EBELING, C. E. 1997. Stochastic Model of a Cold-Stand by System with Waiting for Arrival & Treatment of Server. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering.* McGraw-Hill, Boston. 1997.

Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. **CARVALHO, Carlos.** 2011. Brasília : IPEA, 2011.

Failure mode and effects analysis using grey theory. **CHANG, C., LIU, P. e WEI, C.** 2001. Emerald Insight, pp. 211-216.

FERREIRA, Janderson da Conceição, et al. 2017. Proposta de um método para priorização de risco em FMEA considerando custo de ocorrência do modo de falha em sua etapa de detecção. *Exacta*. Março de 2017, pp. 487-499.

FOGLIATTO, F. 2006. *Notas de Aula da Disciplina de Manutenção e Confiabilidade.* UFRGS. 2006.

FOGLIATTO, F. S. e RIBEIRO, J. L. D. 2009. *Confiabilidade e Manutenção*

Industrial. São Paulo : Elsevier, 2009.

FOLGADO, M. A. S. 2013. *Subestações de Tração e Postos de Catenária Engenharia.* Tomar : s.n., 2013.

FONSECA, Antônio Jorge. 2016. *Sistematização do Processo de Obtenção das Especificações de Projeto de Produtos Industriais e sua Implementação Computacional.* Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : s.n., 2016. p. 198.

GARGAMA, H. e CHATURVERDI, S. 2011. Criticality Assessment Models for Failure Mode Effects and Criticality Analysis Using Fuzzy Logic. *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, VOL. 60, NO. 1. março de 2011.

Gerhardt, Tatiana Engel e Silveira, Denise Tolfo. 2009. Métodos de Pesquisa. 1, 2009.

GEUM, Youngjung, CHO, Yangrae e PARK, Yongtae. 2011. A systematic approach for diagnosing service failure: Service-specific. *Mathematical and Computer Modelling*. 2011, Vol. 54, pp. 3126-3142.

HERPICH, Cristiano e FOGLIATTO, Flávio Sanson. 2013. APLICAÇÃO DE FMECA PARA DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO EM UM SISTEMA DE CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DE TURBOGERADORES. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*. 2013, pp. 70-88.

KANG, Jichuan et al. 2017. Risk assessment of floating offshore wind turbine based on correlation-FMEA. *Ocean Engineering*. 2017, pp. 382–388.

KARDEC, Allan e NASCIF, Julio. 2012. *Manutenção - Função Estratégica.* 4^a. Rio de Janeiro : QUALITYMARK, 2012.

LATINO, Kenneth C. 1996. Failure modes & effects analysis, a modified approach. *National Petroleum Refineries Association (NPRA) Maintenance Conference*. Maio de 1996.

LEAL, F., PINHO, A. F. e ALMEIDA, D. A. 2006. Análise de falhas através da aplicação do FMEA e da Teoria Grey. *Gestão Industrial*. 2006, Vol. 02.

LEE, Zhen e CHEN, Luyuan. 2019. A novel evidential FMEA method by integrating fuzzy belief structure and grey relational projection method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Janeiro de 2019, pp. 136-147.

LIU, Hu-Chen et al. 2013. Failure mode and effects analysis using fuzzy

evidential reasoning approach and grey theory. *Expert Systems With Applications*, 2013, pp. 4403-4415.

MALOZYOMOV, B. V. 2017. *International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017)*. Tomsk : Atlantis Press, 2017.

MANDAL, Saptarshi e MAITI, J. 2014. Risk analysis using FMEA: Fuzzy similarity value and possibility theory. *Expert Systems with Applications*. 2014, pp. 3527-3537.

NETO, Rubens Carlos de Oliveira Neto. 2019. Estudo de viabilidade do modelo metroviário sem paradas. 2019.

PILLAY A., WANG J. 2003. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering and System Safety*. 2003, pp. 69-85.

PINNA, T., et al. 1998. Failure mode and effect analysis on ITER heat transfer systems. *Fusion Engineering and Design*. Setembro de 1998, pp. 431-436.

PRICE, Christopher J. 1996. Effortless Incremental Design FMEA. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*. 1996, pp. 43 - 47 .

RAZI, Farshad Faezy et al. 2013. An FMEA analysis using grey theory and grey rough sets. *Decision Science Letters*. 2013, pp. 299–304.

ROOS, Cristiano, MORAES, Jorge André Ribas e ROSA, Leandro Cantorski da. 2008. MELHORIA DA QUALIDADE NOS SERVIÇOS DE TRANSPORTE UTILIZANDO A FERRAMENTA FMEA. *Revista Gestão Industrial*. 2008, pp. 148-159.

SAKURADA, Eduardo Yuji. 2001. *As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos*. Florianópolis : s.n., 2001.

SAXER, PATRICIA. 2015. *APLICAÇÃO DA FMEA PARA ANÁLISE DE RISCOS NA QUALIDADE DO PROCESSO DE EMBALAGENS EM UMA MULTINACIONAL DE AGROQUÍMICOS*. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. LORENA : s.n., 2015. p. 84.

SHARMA, R. K.; Sharma, P. 2010. System failure behavior and maintenance decision making using RCA, FMEA and FM. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2010, pp. 64-88.

SHARMA, Rajiv Kumar e SHARMA, Pooja. 2010. System failure behavior and maintenance decision making using RCA, FMEA and FM. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2010, pp. 64-88.

- SILVA, Sandra T. e RIBEIRO, Ana P. 2009.** *Fundamentos Microeconómicos da Macroeconomia*. s.l. : Vida Económica Editorial, 2009.
- SOFYALIOĞLU, Çiğdem e ÖZTÜRK, Şule . 2012.** APPLICATION OF GREY RELATIONAL ANALYSIS WITH FUZZY AHP TO FMEA METHOD. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*. 2012, pp. 114-130.
- SOUZA, Carlos Alberto de. 2010.** Proposta de Integração do Sistema de Automação de Subestações Retificadoras do Sistema Metro-ferroviário Brasileiro. Maio de 2010, p. 125.
- SPREAFICO, Christian, RUSSO, Davide e RIZZI, Caterina. 2017.** A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. *Computer Science Review*. Agosto de 2017, pp. 19-28.
- SUYU, C. D. e GÖÇMEN, E., NARLI, M., KOKANGÜL. 2016.** *Classical and fuzzy FMEA risk analysis in a sterilization unit - Department of Industrial Engineering*. Cukurova University. Adana : s.n., 2016.
- SZMEL, Dariusz e WAWRZYNIAK, Dominik. 2017.** APPLICATION OF FMEA METHOD IN RAILWAY SIGNALLING PROJECTS. *Journal of KONBiN*. 2017, pp. 93-110.
- TÉCNICAS, Associação Brasileira de. 1994.** *NBR5462*. 1994.
- TRANSPORTE, Confederação Nacional do. 2018.** <https://cnt.org.br/agencia-cnt/volume-cargas-transportadas-ferrovias-cresce-10-um-ano>. *CNT - Confederação Nacional do Transporte*. [Online] 15 de Agosto de 2018.
- VILLACOURT, M. 1992.** *Failure mode and effect analysis (FMEA): a guide for continuous improvement for semiconductor equipment industry*. s.l. : ASQ Quality Press, 1992.
- XENOS, H. G. 2002.** *Gerenciando a Manutenção Produtiva*. 1^a. s.l. : Falconi, 2002.
- XIAO, Hong e PROVERBS, David. 2003.** Factors influencing contractor performance: an international investigation. *Factors influencing contractor performance: an international investigation*. 2003, pp. 322-332.
- YAZDANI, Morteza et al. 2019.** A fuzzy multi attribute decision framework with integration of QFD and grey relational analysis. *Expert Systems With Applications*. Janeiro de 2019, Vol. 115, pp. 474-485.

YAZDI, Mohammad, DANESSHVAR, Sahand e SETARE, Hashem. 2017. An extension to Fuzzy Developed Failure Mode and Effects Analysis (FDFMEA) application for aircraft landing system. *Safety Science*. Outubro de 2017, pp. 113-123.

YOUNGJUNG, G., YANGRAE, C. e YONGTAE, P. 2011. A systematic approach for diagnosing service failure: Service-specific FMEA and grey relational analysis approach. [A. do livro] Elsevier. *Mathematical and Computer Modelling*. Seoul : Science Direct, 2011, pp. 3126-3142.

ZHOU, Qingji e THAI, Vinh V. 2016. Fuzzy and grey theories in failure mode and effect analysis for tanker equipment failure prediction. *Safety Science*. Março de 2016, pp. 74-79.