

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Willian Felipe Silva Maia

**AVALIAÇÃO DOS RISCOS OPERACIONAIS DE
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA E SUA
REDUÇÃO APLICANDO MÉTODOS DE TOMADA
DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**

Belo Horizonte

2022

Willian Felipe Silva Maia

**AVALIAÇÃO DOS RISCOS OPERACIONAIS DE
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA E SUA
REDUÇÃO APLICANDO MÉTODOS DE TOMADA
DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**

Versão final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel

Coorientador: Dr. Douglas Alexandre Gomes Vieira

Belo Horizonte

2022

M217a	<p>Maia, Willian Felipe Silva. Avaliação dos riscos operacionais de subestações de energia elétrica e sua redução aplicando métodos de tomada de decisão multicritério [recurso eletrônico] / Willian Felipe Silva Maia. - 2022. 1 recurso online (168 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Petr Iakovlevitch Ekel. Coorientador: Douglas Alexandre Gomes Vieira.</p> <p>Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 126-168.</p> <p>Bibliografia: f. 114-125. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Subestações elétricas - Teses. 3. Riscos operacionais - Teses. 4. Alocação de recursos - Teses. I. Ekel, Petr Iakovlevitch . II. Vieira, Douglas Alexandre Gomes. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3(043)</p>
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

Processo: 23072.222655/2022-11 Documento: 1398755



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação dos Riscos Operacionais de Subestações de Energia Elétrica e Sua Redução Aplicando Métodos de Tomada de Decisão Multicritério"

WILLIAN FELIPE SILVA MAIA

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia vinte de abril de 2022, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Dr. Adriano Chaves Lisboa (Engenharia (Gaia Soluções em Engenharia))

Dra. Lívia Maria Leite da Silva (Engenharia (Thunders Tecnologia))

Engº. Dr. DOUGLAS ALEXANDRE GOMES VIEIRA ((UFMG))

Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha (DEE (UFMG))

Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva (DEE (UFMG))

Prof. Ph.D. Petr Iakovlevitch Ekel (PPGEE (UFMG)) - Orientador

Belo Horizonte, 20 de abril de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Petr Iakovlevitch Ekel, Usuário Externo**, em 29/04/2022, às 09:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Este trabalho é dedicado a todas as pessoas que acreditaram que esta conquista acadêmica seria possível.

Agradecimentos

Agradeço à Deus por tudo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Petr Ekel pela oportunidade, paciência e principalmente por me ajudar a chegar até aqui.

Ao meu coorientador Dr. Douglas Vieira por todo suporte técnico e incentivo.

Aos membros da banca os quais contribuíram com desenvolvimento do trabalho: Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha, Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva, Dr. Adriano Chaves Lisboa e Dra. Livia Maria Leite da Silva. Aos professores do PPGEE Dr. André Paim, Dr. Cristiano Leite, Dr. José Osvaldo, Dr. Luis Aguirre, Dra. Maria Helena, pela contribuição em suas disciplinas.

Agradeço a minha esposa Roberta Maia e filha Estela Maia pelo apoio incondicional e paciência.

Aos meus pais José Maria, Reginalda e a tia Magdalena por todo apoio e incentivo.

Ao amigo e irmão Prof. Dr. Kenedy Santos por todo incentivo.

Ao amigo Eduardo Antônio de Castro por me apoiar durante toda a jornada.

Ao amigo Alison Barbosa por toda ajuda.

Aos colegas Mateus Alberto Dorna De Oliveira e Igor Marques Reis por todo suporte técnico.

Aos colegas da PUC MINAS Felipe Diniz Ramalho M.Sc., Dr. Prof. Gustavo Luís Soares e Matheus Libório M.Sc. por todo suporte técnico. A Prof. Dra. Cláudia Morgado da Escola Politécnica da UFRJ pelo apoio.

Aos coordenadores Prof. Dr. Frederico Gadelha Guimarães e Prof. Dr. Eduardo Mazoni Andrade Marçal Mendes por todo suporte ao longo do curso. Aos membros do colegiado, corpo docente, secretariado e alunos do PPGEE.

Aos representantes discentes. Em especial, ao Marcos Alves M.Sc. por todo suporte e dedicação a função.

Aos colegas Anderson Lomasso, Anderson Fernandes Silva, Filipe Resende, M.Sc., Geraldo Majela, Maiza Mafra, Samuel Souza M.Sc., Ued Andril e Wellington Hipólito.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. A maneira mais certa de ter sucesso é sempre tentar mais uma vez.”

Thomas Edison

Resumo

O presente trabalho dedica-se ao desenvolvimento de uma metodologia que visa melhorar a qualidade da estimativa de risco operacional de subestações de energia utilizando modelos e métodos de tomada de decisão multicritério. A aplicação da metodologia proposta permite avaliar, comparar, priorizar e/ou ordenar subestações de energia do ponto de vista risco operacional e alocar racionalmente os recursos disponíveis para reduzir o risco operacional. Em particular, é apresentado um método de Avaliação de Redução de Risco Sistêmico (SRRA) que integra conceitos de avaliação de risco e técnicas de tomada de decisão multicritério. O uso de SRRA torna possível levar em consideração a opinião de especialistas para obtenção de estimativas de risco operacional. Essas estimativas servem para alocar recursos entre subestações no âmbito de modelos multicritério. Sua análise é baseada na aplicação da modificação da abordagem de Bellman-Zadeh para a tomada de decisão em um ambiente *fuzzy*, fornecendo soluções multicritério harmoniosas. A principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento de um método que considera informações técnicas e de segurança para alocação de recursos na resolução de problemas de risco operacional. O principal fator inovador é a melhoria e redução da subjetividade dos modelos tradicionais de matriz de risco que permitiu a obtenção de estimativas de risco para a preparação de informações para a alocação de recursos. A aplicação de fundamentos metodológicos para construção e análise dos modelos $\langle X, F \rangle$ (como modelos multiobjetivo) para alocar racionalmente os recursos disponíveis para reduzir o risco operacional é outro fator inovador deste trabalho. Esta abordagem já foi amplamente utilizada para resolver vários problemas de engenharia de energia, e é utilizada nesta pesquisa, pela primeira vez, para alocação de recursos para resolver problemas de risco operacional. O Estudo de Caso, referente a um grupo de subestações, convencionalmente demonstra a possibilidade de redução a subjetividade da avaliação de risco e a melhoria da qualidade das decisões tomadas em recursos alocação.

Palavras-chave: Abordagem Bellman-Zadeh, alocação de recursos, análise de risco, avaliação de risco, matriz de risco, prevenção de acidentes, segurança em eletricidade, subestações, tomada de decisão.

Abstract

The present work is dedicated to developing a methodology aimed at improving the quality of operational risk estimation for power substations applying models and methods of multicriteria decision making. The application of the proposed methodology allows one to assess, compare, prioritize, and/or order power substations from the point of view of operational risk and to rationally allocate available resources to reduce operational risk. In particular, it is presented a method of Systemic Risk Reduction Assessment (SRRA) that integrates concepts of risk assessment and multicriteria decision making techniques. The use of SRRA makes it possible to take into account expert opinions to obtain the operational risk estimates. These estimates serve for allocating resources between substations within the framework of a multicriteria models. Their analysis is based on applying the modification of the Bellman-Zadeh approach to decision making in a fuzzy environment, providing harmonious multicriteria solutions. The main contribution of this research is the development of a method that considers technical and safety information for resource allocation in solving operational risk problems. The main innovative factor is the improvement and reduction of the subjectivity of the traditional risk matrix models that allows obtaining risk estimates to the preparation of information for the allocation of resource. The application of methodological foundations for the construction and analysis of $\langle X, F \rangle$ models (as multiobjective models) to rationally allocate available resources to reduce operational risks is another innovative factor of this work. This approach has already been widely used to resolve various power engineering problems, and is utilized in this research, for the first time, for resource allocation in solving operational risk problems. The case study, related to a group of substations, conventionally demonstrates the possibility of reducing the subjectivity of the risk evaluation and the improvement of the quality of decisions made in resource allocation.

Keywords: Accident prevention, allocation of resources, Bellman–Zadeh approach, decision making, electrical safety, substations, risk analysis, risk assessment, risk matrix.

Lista de Figuras

Figura 1 – Matriz de risco.	32
Figura 2 – Hierarquia de Controle de Riscos.	39
Figura 3 – Processo de avaliação de risco.	40
Figura 4 – <i>Hazard identification, risk assessment and risk control model.</i>	41
Figura 5 – Diagrama universal <i>Bowtie.</i>	41
Figura 6 – <i>Fault Tree Analysis.</i>	44
Figura 7 – <i>Layer of Protection Analysis</i>	45
Figura 8 – Modelo mental da hierarquia matemática.	77
Figura 9 – Matriz de risco numérica.	80
Figura 10 – Fluxograma do modelo ARRS.	81
Figura 11 – Avaliação de risco.	90
Figura 12 – Avaliação de risco PS01.	100
Figura 13 – Avaliação de risco PS02.	101
Figura 14 – Avaliação de risco PS03.	101
Figura 15 – Resultado da avaliação de risco das subestações.. . . .	102
Figura 16 – Aplicativo <i>AIDMS2.</i>	105
Figura 17 – Certificado de participação.	129
Figura 18 – Reportagem no site sobre a conferência.	131

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Escala de relativa importância de Saaty	54
Tabela 2 – Matriz comparativa	54
Tabela 3 – Matriz comparativa do grupo de critérios	54
Tabela 4 – Soma das colunas	55
Tabela 5 – Matriz comparativa normalizada do grupo de critérios	55
Tabela 6 – Cálculo do vetor de <i>Eigen</i> (Média)	55
Tabela 7 – Índices de consistência aleatória (RI)	56
Tabela 8 – Significado dos termos do <i>MAUT</i>	58
Tabela 9 – Especificação técnica das subestações de energia elétrica	85
Tabela 10 – Critérios para consequência	87
Tabela 11 – Critérios para probabilidade - D1	88
Tabela 12 – Critérios para probabilidade - D2	88
Tabela 13 – Critérios para probabilidade - D3	89
Tabela 14 – Critérios para probabilidade - D4	89
Tabela 15 – Matriz de comparação de pares 1	90
Tabela 16 – <i>Eigenvector e Eigenvalue 1</i>	90
Tabela 17 – Avaliação da consistência 1	90
Tabela 18 – Matriz de comparação de pares 2	91
Tabela 19 – <i>Eigenvector e Eigenvalue 2</i>	91
Tabela 20 – Avaliação da consistência 2	91
Tabela 21 – Matriz de comparação de pares 3	91
Tabela 22 – <i>Eigenvector e Eigenvalue 3</i>	91
Tabela 23 – Avaliação da consistência 3	92
Tabela 24 – Matriz de comparação de pares 4	92
Tabela 25 – <i>Eigenvector e Eigenvalue 4</i>	92
Tabela 26 – Avaliação da consistência 4	92
Tabela 27 – Matriz de comparação de pares 5	92
Tabela 28 – <i>Eigenvector e Eigenvalue 5</i>	92
Tabela 29 – Avaliação da consistência 5	93
Tabela 30 – Matriz de comparação de pares 6	93
Tabela 31 – <i>Eigenvector e Eigenvalue 6</i>	93

Tabela 32 – Avaliação da consistência 6	93
Tabela 33 – Escala linguística - J_n - consequência.	94
Tabela 34 – Escala linguística - D1 - probabilidade.	94
Tabela 35 – Escala linguística - D2 - probabilidade.	94
Tabela 36 – Escala linguística - D3 - probabilidade.	95
Tabela 37 – Escala linguística - D4 - probabilidade.	95
Tabela 38 – Tabela numérica consequência PS1.	96
Tabela 39 – Tabela numérica probabilidade PS1 - P1.	96
Tabela 40 – Tabela numérica probabilidade PS1 - P2.	96
Tabela 41 – Tabela numérica probabilidade PS1 - P3.	96
Tabela 42 – Tabela numérica probabilidade PS1 - P4.	97
Tabela 43 – Tabela numérica consequência PS2.	97
Tabela 44 – Tabela numérica probabilidade PS2 - P1.	97
Tabela 45 – Tabela numérica probabilidade PS2 - P2.	97
Tabela 46 – Tabela numérica probabilidade PS2 - P3.	98
Tabela 47 – Tabela numérica probabilidade PS2 - P4.	98
Tabela 48 – Tabela numérica consequência PS3.	98
Tabela 49 – Tabela numérica probabilidade PS3 - P1.	98
Tabela 50 – Tabela numérica probabilidade PS3 - P2.	99
Tabela 51 – Tabela numérica probabilidade PS3 - P3.	99
Tabela 52 – Tabela numérica probabilidade PS3 - P4.	99
Tabela 53 – Tabela ponderação probabilidade PS1.	99
Tabela 54 – Tabela ponderação probabilidade PS2.	100
Tabela 55 – Tabela ponderação probabilidade PS3.	100
Tabela 56 – Resultado da avaliação do risco operacional	102
Tabela 57 – Demanda necessária por subestação em R\$	103
Tabela 58 – Resumo das demandas e recurso disponível	103
Tabela 59 – Resultado da alocação de recursos	104

Lista de Abreviaturas e Siglas

AIC	Agregação de preferências por critério
AIE	Agregação de avaliações individuais
AIR	Agregação dos resultados individuais
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ARRS	Análise de Redução de Risco Sistemica
BTA	<i>Bowtie analysis</i>
ELECTRE	<i>ELimination and Choice Expressing the REality</i>
FMEA	<i>Failure Modes, Effects Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
HAZOP	<i>Hazard Operability Study</i>
HIRARC	<i>Hazard Identification Risk Assessment and Risk Control</i>
JSA	<i>Job Safety Analysis</i>
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i>
MAUT	<i>Multiple Attribute Utility Theory</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
SODA	<i>Strategic Options Development and Analysis</i>
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
SRRA	<i>Systemic Risk Redcution Analysis</i>
URRS	<i>Union of Soviet Socialist Republics</i>

Lista de símbolos

A_i	Escassez de recursos
A_h	Respostas das questões relacionadas à probabilidade
A_p	Função objetiva
B_f	Valores obtidos com o somatório das respostas A_h
C_i	Consequência do i -ésimo evento
C	Conjunto de critérios aplicáveis ao processo de tomada de decisão
CI	Índice de consistência
$CRatio$	Taxa de consistência
c_{pi}	i -ésimo consumidores
Δ_{xi}	Volume de limitações de recursos buscados para o i -ésimo consumidor
D_i	Recursos disponíveis
D_k	Resultado da multiplicação entre ω_k e K_k
e	Equipe de especialistas envolvidos no processo de decisão
F_f	Indicador da avaliação do f -ésimo subcritério
F_p	p -ésima função objetivo normalizada
G_j	Respostas das questões relacionadas à consequência
J_j	Resultado da multiplicação entre ω_j e G_j
K_k	Somatório dos f -ésimos F_f
max	maximização
min	minimização
$\mu_{A_p}(X)$	Função de pertinência

λ_{Max}	Valor máximo de λ aplicável ao método <i>AHP</i>
R_i	Valor do risco do i -ésimo evento
RT_i	Total de recursos disponíveis
RI	Índice de consistência randômica
P_i	Probabilidade de ocorrência do i -ésimo evento
ω_j	Valor do peso do j -ésimo critério relacionado à probabilidade
ω_k	Valor do peso do k -ésimo critério relacionado à consequência
ω_f^k	Valor do peso do k -ésimo subcritério
ω_x	Valor do peso do k -ésimo critério ou subcritério
\forall	Para todo
x_i	Volume de recursos dos i -ésimo consumidores c_{pi}
X	Conjunto de alternativas aplicáveis ao processo de tomada de decisão
$\langle X, F \rangle$	Modelos de tomada de decisões multiobjetivo
$\langle X, R \rangle$	Modelos de tomada de decisões multiatributo

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Justificativa	20
1.2	Objetivos	21
1.3	Contribuições	23
1.4	Publicações	25
1.4.1	Publicações relacionadas à pesquisa	25
1.4.2	Outras publicações	25
2	Revisão de Literatura	26
2.1	Avaliação de risco em subestações de energia elétrica	26
2.2	Considerações finais	30
3	Avaliação de Risco	31
3.1	Conceitos sobre análise de risco	31
3.2	Matriz de risco	32
3.3	Conceitos sobre avaliação de risco	35
3.4	Técnicas de análise de risco	38
3.4.1	Hierarquia de controle de risco	38
3.4.2	Avaliação de risco - <i>National Fire Protection Association (NFPA)</i>	38
3.4.3	Avaliação de risco ISO-31000-2018	39
3.4.4	<i>Hazard Identification, Risk Assessment and Risk Control</i>	40
3.4.5	<i>Bowtie analysis (BTA)</i>	40
3.4.6	<i>Hazard & Operability Study (HAZOP)</i>	42
3.4.7	<i>Failure Modes, Effects Analysis (FMEA)</i>	42
3.4.8	<i>Fault Tree Analysis (FTA)</i>	43
3.4.9	<i>Job Safety Analysis (JSA)</i>	44
3.4.10	<i>Layer of Protection Analysis (LOPA)</i>	44
3.4.11	<i>Delphi</i>	45
3.4.12	<i>Strategic Options Development and Analysis (SODA)</i>	46
3.5	Considerações finais	47
4	Tomada de decisão multicritério	49
4.1	Tomada de decisão em ambiente <i>fuzzy</i>	50
4.2	Modelos $\langle X, R \rangle$ - multiatributo	52
4.2.1	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	53
4.2.2	<i>Multiple Attribute Utility Theory (MAUT)</i>	57
4.3	Tomada de decisão multiobjetivo	58
4.4	Tomada de decisão em grupo	65
4.5	Fuzzy Set Based Consensus Scheme	66

4.6	Considerações finais	68
5	Alocação de recursos - Modelo $\langle X, F \rangle$	69
5.1	Aspectos gerais	69
5.2	Alocação de recursos ou seus déficits e escassez	72
5.2.1	Alocação de recursos disponíveis	72
5.2.2	Alocação de escassez de recursos com cortes não limitados	73
5.2.3	Alocação de escassez de recursos com cortes limitados	73
5.3	Considerações finais	73
6	Metodologia Proposta	75
6.1	Análise de Redução de Risco Sistêmica - ARRS	76
6.2	Considerações finais	82
7	Resultados	84
7.1	Exemplo de aplicação: subestações de energia elétrica	84
7.1.1	Contextualização da avaliação de risco	85
7.1.2	Seleção das subestações	85
7.1.3	Definição dos especialistas	85
7.1.4	Definição dos critérios e subcritérios	85
7.1.5	Classificação dos critérios e subcritérios	86
7.1.6	Estruturação da hierarquia dos critérios e sub-critérios	87
7.1.7	Ponderação dos critérios e subcritérios - <i>AHP</i>	87
7.1.8	Elaboração de questionário	93
7.1.9	Realização da avaliação de risco	95
7.1.10	Integração dos resultados	95
7.1.11	Resultado da avaliação de risco	102
7.1.12	Realização da alocação de recursos	102
7.2	Considerações finais	105
8	Originalidade no trabalho	107
9	Conclusões	110
10	Trabalhos futuros	113
	Referências	114
	Apêndice A Artigo principal publicado - IEEE 2021	126
	Apêndice B Certificado de participação em conferência internacional	128
	Apêndice C Matéria sobre evento e artigo publicado em conferência	130
	Apêndice D Jornal sobre evento e artigo publicado em conferência	132
	Apêndice E Questionário de avaliação da subestação PS1	135
	Apêndice F Questionário de avaliação da subestação PS2	146

Apêndice G Questionário de avaliação da subestação PS3	157
--	-----

Capítulo 1

Introdução

A eletricidade é uma forma de energia indispensável para diversos segmentos da indústria e também para a vida humana. O uso indevido da eletricidade pode resultar em danos à saúde dos trabalhadores e as instalações elétricas, provocando, por consequência, perdas produtivas (BRENNER, 2013; FLOYD, 2014; BAKA e UZUNOGLU, 2014; CAMPBELL, 2018; KUDRYAVTSEV et al., 2018; S. D. PARK, 2019; J. R. WHITE e S. JAMIL, 2020).

A ocorrência de acidentes de origem elétrica normalmente provoca danos pessoais aos trabalhadores, incluindo lesões graves e fatalidades. Além de perdas produtivas, pode-se gerar gastos com processos judiciais e multas aplicadas por órgãos fiscalizadores (BRENNER, 2013; KOUSTELLIS et al., 2013; NFPA, 2018).

A frequência reduzida de ocorrências de acidentes de origem elétrica, se comparada aos demais tipos de riscos, pode acarretar uma compreensão equivocada de que a gestão do perigo elétrico está sob controle. Devido a esta falsa informação, trabalhadores acabam por reduzir a atenção durante a realização de suas atividades e por consequência se acidentam displicentemente (FLOYD, 2014).

De acordo com (CAMPBELL, 2018), nos Estados Unidos, 739 trabalhadores morreram por exposição à eletricidade, em torno de 3 mortes por semana no período entre 2012 a 2016). Já no contexto brasileiro, no ano de 2018, ocorreram 1424 acidentes e morreram 602 pessoas devido a acidentes de origem elétrica, o que representa quase duas mortes por dia.

Identificar e implementar uma gestão qualificada com vistas à diminuição dos riscos envolvidos no processo de manutenção de subestações de energia tornou-se cada vez mais necessário por parte das empresas que atuam neste segmento (BRENNER, 2013).

A não realização da análise de risco durante a execução das tarefas, associada a comportamentos inadequados e condições em que se encontram as instalações elétricas são os principais fatores contribuintes na ocorrência de acidentes em subestações de energia (BRENNER, 2013; KOUSTELLIS et al., 2013).

A complexidade em se realizar a avaliação de riscos e definir o melhor destino da verba disponível tem sido o grande desafio para as empresas (SIQUEIRA, 2010; D. T. ROBERTS, 2019). A ausência de pesquisas na área e dados estatísticos consistentes e inexistência de informações que recuperem o histórico de atuação obrigam os profissionais a adotarem métodos de tomada de decisão intuitivos e empíricos, fazendo uso de julgamentos pessoais (BRENNER, 2013; KOUSTELLIS et al., 2013).

No entanto, levando em consideração os resultados de (RAMALHO et al., 2019), é possível desenvolver métodos que permitam a alocação racional de recursos entre subestações de energia, analisando modelos de tomada de decisão multicritério integrados ao conceito de risco. Esses modelos geralmente envolvem n alternativas que devem ser avaliadas do ponto de vista de um conjunto de critérios. Tais alternativas, do ponto de vista de risco operacional, muitas vezes são avaliadas por um grupo de especialistas e essas avaliações são baseadas em seus conhecimentos, experiências e intuição, e também nas escolhas individuais (PEDRYCZ et al., 2011).

Nesse contexto, a presente pesquisa visa desenvolver uma metodologia apoiada em técnicas de tomada de decisão para reduzir a subjetividade no processo de avaliação de risco operacional das subestações de energia. Utiliza-se os resultados para realizar a alocação de recursos financeiros disponíveis no processo de gerenciamento de manutenção.

A pesquisa proposta visa, de fato, promover a redução da frequência e gravidade das consequências de acidentes elétricos no processo de operação de subestações de energia.

Ao mesmo tempo, os resultados da pesquisa são de caráter geral e tem potencial para serem aplicados em outros tipos de problemas, uma vez que os conceitos de avaliação de risco e tomada de decisão estão devidamente integrados.

Um dos resultados mais importantes da pesquisa é o método proposto denominado Análise de Redução de Risco Sistêmica (ARRS) ou em inglês Systemic Risk Reduction Analysis (SRRA). As suas principais características são apresentadas a seguir:

- Definição dos critérios relacionados à avaliação de riscos em operar subestações de energia;
- Padronização de critérios e modos de avaliação;
- Uso do conhecimento de profissionais experientes na ponderação os critérios.

As funções mais significativas do ARRS são as seguintes:

- Geração de soluções baseadas na integração dos conceitos de riscos e técnicas de tomada de decisão multicritério;
- Integração de critérios e subcritérios para a construção de uma matriz de risco;
- Redução da subjetividade na avaliação de risco;
- Preparação de informações para alocação de recursos;
- Redução da inadequação ou falta de dados estatísticos.

1.1 Justificativa

A determinação das subestações mais críticas em termos de segurança operacional é necessária, incluindo, para a utilização racional dos recursos financeiros, que normalmente são limitados. No entanto, as decisões sobre a alocação de recursos disponíveis entre as subestações são geralmente realizadas empiricamente.

A priorização inadequada de subestações de energia elétrica e a alocação incorreta de investimentos em revitalizações podem comprometer a segurança dos trabalhadores e resultar em perdas operacionais significativas (DOLEZILEK, 2011; BRENNER, 2013).

Diante do exposto verifica-se uma oportunidade de desenvolver e aperfeiçoar métodos que permitam realizar uma alocação de recursos mais racional baseada em técnicas de tomada de decisão integradas a conceitos sobre componentes do risco.

A aplicação da abordagem multicritério contempla modelos e métodos que auxiliam os decisores a resolverem problemas que envolvem a avaliação, comparação, priorização e/ou ordenação, conforme múltiplos critérios (PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2019). Esses problemas em geral envolvem uma quantidade diversificada de alternativas e critérios. Tais soluções são frequentemente avaliadas por um grupo de especialistas e utilizam o seu conhecimento, experiência ou intuição relacionado ao assunto e também escolhas individuais (PEDRYCZ et al., 2011).

O trabalho de (PERREIRA JR., 2014) afirma que diversos tipos de incerteza são identificadas em diversos problemas de tomada de decisões relacionados ao projeto, planejamento, operação, sistemas complexos e controle de sistemas elétricos de potência. As principais causas do fator de incerteza são apresentadas a seguir (PERREIRA JR., 2014):

- Dificuldade de se obter uma quantidade suficiente de informações confiáveis;

- Falta de previsões confiáveis das características, propriedades e comportamento de sistemas complexos;
- Objetivos e restrições mal definidos em tarefas de projeto, planejamento, operação e controle;
- Impossibilidade de formalizar uma série de fatores e critérios, além da necessidade de se considerar informações de caráter qualitativo;
- O papel significativo do “fator humano” na tomada de decisões. Assim, a situação de incerteza deve ser considerada como natural e inevitável no contexto de problemas de tomada de decisões.

Considera-se naturais e inevitáveis as situações de incertezas no contexto de problemas de tomada de decisões. A utilização de modelos matemáticos serve para adequar os problemas em questão e aumentar a credibilidade e a eficiência das decisões (PERREIRA JR., 2014).

Conforme (EKEL et al., 2016) existem duas classes de problemas que necessitam do uso de abordagem multicritério. A primeira refere-se a problemas onde as consequências das soluções não podem ser estimadas de acordo com um único critério. A segunda refere-se a problemas que, inicialmente, podem requerer um único critério ou vários critérios, porém não é possível obter soluções únicas, devido à incerteza das informações, que pode ser diminuída por meio da introdução de critérios adicionais, sejam de caráter quantitativo ou qualitativo.

A aplicação desses modelos visa reduzir a subjetividade mediante a existência de múltiplos critérios, conflitos entre esses e definir a melhor alternativa (EKEL et al., 2016).

Os métodos existentes de tomada de decisão multicritério permitem que diversos aspectos complexos e conflitantes sejam resolvidos ou, pelo menos, parcialmente superados (EKEL e PARREIRAS, 2008; PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2016).

A tarefa mais desafiadora que se faz presente no processo de tomada de decisão é a de escolher quais são os fatores mais adequados e relevantes (SAATY, 1990).

1.2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa está associado com o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia baseada em técnicas de tomada de decisão multicritério aplicadas a conceitos sobre riscos, visando reduzir a subjetividade durante o processo de avaliação de riscos operacionais em subestações de energia elétrica, para realização de alocação de recursos financeiros.

O objetivo geral abrange os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento e aperfeiçoamento de métodos da análise de alternativas, aplicáveis para identificação, avaliação, comparação, escolha, priorização e/ou ordenação das subestações de energia elétrica de ponto de vista de risco operacional;
- Definição de método que permita reduzir a subjetividade da avaliação de risco para alocação de recursos financeiros.

Neste contexto, a presente pesquisa teve como meta final realizar uma avaliação de subestações de forma a identificar preventivamente os riscos potenciais e estabelecer as medidas de controles. Essa informação foi utilizada como parâmetro para realizar a alocação de recursos entre as subestações de energia elétrica em estudo.

Particularmente, deseja-se resolver as seguintes classes de problemas de risco operacional:

- Redução da subjetividade no processo de avaliação do grau de risco operacional proporcionado pelas subestações de energia elétrica em estudo;
- Alocação multiobjetivo de recursos financeiros entre as subestações de energia elétrica conforme relevância e estado operacional;
- Geração de informações relevantes para aprimorar o gerenciamento das subestações de energia elétrica devido à falta de confiabilidade ou inexistência de banco de dados contendo informações sobre os equipamentos, que possam ser utilizados no desenvolvimento de análise de risco e alocação de recursos.

Técnicas confiáveis para a tomada de decisão, *Analytic Hierarchy Process (AHP)* e análise dos modelos $\langle X, F \rangle$ para alocação de recursos, técnicas de avaliação de risco, normas internacionalmente reconhecidas e legislação local vigente foram utilizadas como base para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de métodos aplicáveis na gestão dos riscos existentes em subestações de energia elétrica.

Ressalta-se que o estudo proposto possui a potencialidade de aplicação em outros tipos de problemas em que os conceitos de avaliação de risco e tomada de decisão estejam devidamente integrados. Desta forma, novos trabalhos no campo da gestão de riscos poderão ser desenvolvidos a partir desta pesquisa.

Outro aspecto importante é a possibilidade e redução das incertezas quanto a avaliação de risco. Métodos atuais como, por exemplo, *HIRARC*, *BTA*, *HAZOP*, *FMEA*, *FTA*, *JSA*, *LOPA*, *Delphi* e *SODA* não permitem que uma avaliação sistêmica seja realizada adotando técnicas de ponderação que considera a relevância específica de cada critério. Tais

critérios e seus respectivos pesos são definidos por grupo de especialistas. Esta medida teve como objetivo minimizar eventuais interesses pessoais ou erros individuais que distorcem o resultado final da avaliação de risco.

Nesse contexto, a presente pesquisa visa desenvolver uma metodologia baseada em técnicas de tomada de decisão para reduzir subjetividade no processo de avaliação de riscos operacionais de subestações de energia. Os resultados da avaliação servem de base para a alocação dos recursos financeiros disponíveis no processo de gerenciamento de manutenção. O Estudo de Caso também é um aspecto original deste trabalho e fornece resultados úteis para engenheiros, gerentes e empresas de mineração e concessionárias.

A principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento do método ARRS que gera informações técnicas e de segurança para alocação de recursos na resolução de problemas relacionados à riscos operacionais.

O principal fator inovador é a melhoria e redução da subjetividade dos modelos tradicionais de matriz de risco (por exemplo, (COX JR, 2008; MARKOWSKI e MANNAN, 2008; DUIJM, 2015; BAO et al., 2017; RUAN et al., 2015; SUTTON, 2015; BSI, 2018; LI et al., 2018) que permitiu a obtenção de estimativas de risco para a preparação de informações para a alocação de recurso.

Por fim, a pesquisa proposta, em sua essência, visa contribuir com redução de acidentes de origem elétrica a partir de um estudo teórico, bem como a verificação de métodos desenvolvidos e aprimorados.

1.3 Contribuições

A contribuição ampla desta pesquisa está relacionada com o desenvolvimento de fundamentos metodológicos para a análise adequada e efetiva de problemas de tomada de decisões multicritério no contexto de avaliação do risco operacional. Especificamente no campo da Engenharia de Segurança do Trabalho em Eletricidade. Como estudo de caso, aplicou-se o modelo em um grupo de subestações de energia elétrica de forma a verificar a eficácia da pesquisa.

A pesquisa proposta como por objetivo identificar as subestações de energia elétrica mais críticas. Esse procedimento torna-se relevante visto a necessidade do gestor definir a aplicação correta do investimento. A utilização de métodos fundamentados na tomada de decisão permitiu a redução dos questionamentos e trará maior segurança no processo de tomada de decisão. É importante ressaltar que erros nesse tipo de processo podem comprometer a segurança das pessoas que atuam nas subestações de energia elétrica.

Além disso, a pesquisa possui um potencial de aplicação no setor elétrico, incluindo subestações de energia elétrica de indústrias e concessionárias de energia. Os estudos teóricos poderão subsidiar outros trabalhos neste campo. Já a metodologia e melhorias propostas poderão serem replicadas por todas as empresas que possuem subestações de energia elétrica. Para o sucesso e replicação deste trabalho faz-se necessário elaborar uma metodologia robusta e que possua fácil aplicação em campo. Como contribuições específicas podemos citar:

- Definição de uma nova metodologia que permita gerar informações para realizar alocação de recursos de forma mais racional;
- Realização de estudo em nível de doutorado no campo da Segurança em Eletricidade dedicado a riscos em subestações de energia elétrica;
- Aplicação das abordagens a serem desenvolvidas nesta pesquisa na solução de problemas reais de engenharia;
- Contribuição no processo de prevenção de acidentes.

A meta do trabalho foi apresentar uma metodologia que permita avaliar, comparar, selecionar, priorizar e/ou ordenar a subestação que deverá receber prioritariamente investimentos para redução de risco operacional. As funções mais significativas desta metodologia são as seguintes:

- Geração das soluções com base na integração dos conceitos sobre riscos e técnicas para a tomada de decisão multicritério;
- Realização de ponderação dos critérios e subcritérios de forma integrada;
- Redução da subjetividade durante a avaliação de risco;
- Distribuição racional dos recursos financeiros entre as subestações;
- Apresentação de um método que possa ser aplicado em outros contextos.

Este documento é dividido em nove capítulos, além da Introdução. Na seção II, será mostrado a revisão de literatura. Na seção III, apresenta-se a fundamentação teórica sobre riscos. Na seção IV, apresenta-se a fundamentação teórica sobre tomada de decisão multicritério. Na seção V, apresenta-se a fundamentação teórica sobre alocação de recursos. Na seção VI, apresenta-se a metodologia proposta denominada Análise de Redução de Risco Sistêmica (ARRS). Na seção VII, são demonstrados os resultados obtidos nesta pesquisa. Na seção VIII, apresentam-se informações sobre a originalidade do trabalho. Na seção IX, apresentam-se as conclusões de trabalho. Por fim, na seção X apresentam-se as propostas de trabalhos futuros.

1.4 Publicações

1.4.1 Publicações relacionadas à pesquisa

Os estudos realizados para a produção desta pesquisa resultaram nas seguintes publicações:

- W. Maia et al., "Evaluation of Operational Risk in Power Substations and Its Rational Reduction on the Basis of Multicriteria Allocating Resources," in IEEE Access, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3124529. Apêndice A Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9597525> (W. MAIA et al., 2021);
- Maia, W. F. S.; Ekel, P. Expert Opinion-Based Power Substation Risk Assessment For Prevention Of Accidents. In: Live issues of energy saving as a requirement of life safety. Kyiv, Ukraine: National Technical University Of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018. p. 5. ISBN 978-966-699-935-4. Disponível em: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/9492/3/20180611_301_Zmist.pdf O certificado de participação e reportagens sobre o assunto estão disponíveis no apêndice B, C e D. (MAIA e EKEL, 2018).

1.4.2 Outras publicações

- Libório, Matheus, Maia, Willian, Martins, Carlos, Ekel, Petr, Laudares, Sandro, Bernardes, Patricia. (2020). Reducing Costs of Preventive Lightning Systems by Locational Optimization. GOT - Geography and Spatial Planning Journal. 20. 149-166. 10.17127/got/2020.20.007. Disponível em: <http://cegot.org/ojs/index.php/GOT/article/view/2020.20.007> (LIBÓRIO et al., 2020).

Capítulo 2

Revisão de Literatura

2.1 Avaliação de risco em subestações de energia elétrica

Neste capítulo destacam-se exemplos de estudos que utilizam técnicas de análise de risco em subestações de energia elétrica.

A literatura correlata apresenta poucos estudos que analisam e aplicam modelos de tomada de decisão associados à avaliação de risco (ZHANG et al., 2009; SIQUEIRA, 2010; TANAKA et al., 2010; L. WEI et al., 2011; DIMOPOULOS et al., 2012; BRENNER, 2013; VERMA et al., 2013; GUO et al., 2014; GAO et al., 2014; OMIDVAR et al., 2014; ZHOU et al., 2017; Z. ZOU et al., 2019; LIU et al., 2020).

Em (ZHANG et al., 2009) apresenta-se um método de avaliação de risco da operação de uma subestação baseado no método *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, que utiliza números *fuzzy* triangulares e um modelo cognitivo denominado *cloud model*. O autor afirma que a avaliação de risco de uma subestação é de natureza complexa. Desta forma propõe-se um índice de avaliação para operação da subestação baseado nos seguintes aspectos: homem, máquina, meio ambiente e gerenciamento. O método *AHP* é utilizado para calcular o peso para cada índice e o método é aplicado para registrar os resultados. Os autores demonstram que os índices propostos e método de avaliação podem refletir o nível de risco da subestação de forma intuitiva, flexível e precisa.

No estudo apresentado por (SIQUEIRA, 2010), propõe-se a avaliação de riscos de acidentes graves em grandes centrais elétricas. Técnicas de árvore de falha são utilizadas neste trabalho. Esta avaliação torna-se necessária visto os riscos envolvidos na operação, ocorrência de perdas produtivas e possíveis acidentes envolvendo equipe de operação e clientes. Utiliza-se uma grande subestação localizada em uma área metropolitana para aplicação do método. O Estudo de Caso desvelou que o método é capaz de identificar não somente os riscos existentes nas áreas, mas também as possibilidades de variação dos

riscos da planta quanto aos efeitos das mudanças em equipamentos e na proteção elétrica. A metodologia proposta neste trabalho é aplicada conforme as seguintes etapas:

1. Definição dos níveis de risco e dos modos de falha elétrica das subestações de energia elétrica;
2. Divisão da planta e zoneamento das grandes estações para análise de risco;
3. Identificação de sistemas de proteção automatizado;
4. Modelagem probabilística de equipamentos e regimes de proteção;
5. Estabelecimento das recomendações de manutenção e políticas de proteção para reduzir o risco;
6. Cálculo e identificação de áreas de risco existentes para subestações de energia elétrica real.

O trabalho proposto por (TANAKA et al., 2010) apresenta um procedimento de avaliação das condições de transformadores de potência de quarenta e sete subestações de energia elétrica. Por meio da comparação de vários critérios (idade, fator de carga, número de equipamentos obsoletos, equipamentos apresentando sintomas de falhas, ruído e contaminação do óleo isolante) realiza-se um diagnóstico detalhado dos equipamentos. Utiliza-se o método *AHP* para determinação dos pesos de cada critério de avaliação. Os resultados demonstram a efetividade e praticidade para a avaliação dos equipamentos nas quarenta e sete subestações de energia elétrica.

Em (L. WEI et al., 2011) apresenta-se um estudo de risco financeiro do projeto de construção de uma subestação e um modelo de avaliação de risco financeiro do projeto de subestação baseado na simulação de Monte Carlo. O estudo apresentou o índice de avaliação do risco financeiro do projeto da subestação e analisou os principais fatores de risco na avaliação do risco financeiro do projeto da subestação. Com base nisso, um modelo de avaliação de risco financeiro do projeto da subestação foi definido baseado na simulação de Monte Carlo. Um aplicativo denominado *Crystal Ball* foi desenvolvido pelos autores com o objetivo de avaliar o risco financeiro do projeto de subestação.

Em (DIMOPOULOS et al., 2012) realiza-se uma avaliação de risco envolvendo a probabilidade de eletrocussão em subestações de energia elétrica relacionadas à sistemas de aterramento. A sua aplicação aos sistemas de transmissão elétrica é ilustrada por meio de um caso estudo onde a abordagem é implementada em um sistema de aterramento de uma subestação de 275 kV.

Conforme (BRENNER, 2013) estabelece-se uma proposição de programa de controle do risco elétrico denominado "*How Do you Know?*". O trabalho consiste em apresentar vídeos modulares que reforçam a importância dos programas de segurança em eletricidade e conformidades com normas e regulações. A ferramenta possui recursos de avaliação de riscos *on-line* que permitem o auto desenvolvimento dos participantes. O conteúdo do programa contempla uma série de questões que ajudam a rever e analisar os riscos elétricos. Os resultados demonstram que o programa contribuiu para a redução de acidentes.

Os estudos de (VERMA et al., 2013) apresentam uma técnica de árvore de falha baseada em números *fuzzy* trapezoidais não normal analisar o nível de confiabilidade de sistemas de subestações. Utiliza-se números *fuzzy* trapezoidais para registrar os dados coletados e reduzir as incertezas. Um exemplo de subestação de 66/11 kV é dado para demonstrar o método. Além disso, problemas de avaliação *fuzzy* de risco são descritos para descobrir a probabilidade de falha de cada componente do sistema usando variáveis linguísticas, que podem ser usadas para a tomada de decisão gerencial e estratégia de manutenção futura do sistema.

Os estudos de (GUO et al., 2014) apresentam uma metodologia para avaliação de riscos de sistemas de automação em subestações de energia elétrica, incluindo o cálculo da probabilidade de falhas e determinação de pesos da função de riscos utilizando a metodologia *AHP*.

Em (GAO et al., 2014) apresenta-se um método para avaliar de risco de segurança da informação para sistemas de comunicação de subestação utilizando *grey clustering* em conjunto com os métodos *AHP* e *Delphi*. Os autores afirmam que este modelo pode avaliar efetivamente os riscos do sistema de comunicação da subestação e fornecer orientação teórica para a gestão de riscos e o estabelecimento do sistema de proteção de segurança.

O trabalho apresentado por (OMIDVAR et al., 2014) envolve a realização da avaliação de risco relacionada à abalos sísmicos em subestações de energia elétrica. Por meio da utilização de ferramentas de análise de risco, verifica-se que a implementação de um sistema de ancoragem mais robusto pode contribuir com a redução de perdas provocadas pelos terremotos.

Em (ZHOU et al., 2017), a teoria dos grafos e o modelo de contágio de risco são introduzidos para realizar avaliação de risco do sistema secundário e primário de subestações. A avaliação de risco do sistema secundário é decomposta em duas partes. Um é o seu próprio risco (risco secundário), outro está focado na quantificação do risco primário correspondente (risco primário). O modelo de avaliação de risco é estabelecido contemplando a definição dos elementos básicos, construção da rede de contágio de risco e composição da matriz de correlação. Em seguida, um conjunto de índices de risco para

o sistema secundário de subestação é apresentado de acordo com as necessidades dos diferentes departamentos de operação. Finalmente, um sistema secundário de instância de uma subestação inteligente foi modelado para testar a validade do modelo proposto. Os autores afirmam que o resultado obtido é considerado satisfatório para realizar avaliação de risco de subestações.

O trabalho realizado por (Z. ZOU et al., 2019) propõe uma ferramenta inteligente de avaliação de segurança da informação de subestações por meio da pesquisa e análise de risco e método de avaliação de segurança da informação. O estudo afirma que a ferramenta é efetiva na avaliação da segurança da informação.

A pesquisa realizada por (LIU et al., 2020) tem por objetivo apresentar uma estrutura para investigar a eficácia das estratégias de mitigação de riscos em sistemas de energia elétrica sujeitos a perigos sísmicos e de furacões. A estrutura inclui modelo de análise de risco ponderada, modelos de vulnerabilidade de componente, modelo de desempenho de sistema com base topológica, medida de importância de componente apropriada para sistemas em rede e análise de custo do ciclo de vida. Uma rede de energia elétrica é utilizada para demonstrar a estrutura proposta. As etapas propostas pelo estudo são apresentadas a seguir:

1. Identificação do perigo que pode impactar o sistema elétrico;
2. Avaliação do perigo contemplando escolha probabilística ou análise do cenário e análise da vulnerabilidade dos componentes;
3. Avaliação de risco dos múltiplos perigos por meio de agregações ou comparações;
4. Mitigação do risco identificando os componentes críticos e realizando a seleção da estratégia de mitigação;
5. Avaliação da efetividade da estratégia de mitigação utilizando análise de custo benefício;
6. Realização da tomada de decisão baseada na confiabilidade do sistema e nos custos envolvidos.

Os trabalhos citados utilizam a análise de dados para solucionar problemas de avaliação de risco. Em algumas circunstâncias, não há dados históricos disponíveis. Por este motivo, as opiniões de especialistas são consideradas para obter as estimativas de risco operacional e reduzir a inadequação ou falta de dados estatísticos.

Em todos os trabalhos citados, questões relacionadas à avaliação sistemática de risco de subestações de energia não são consideradas. Essas obras são dedicadas à solução de problemas específicos, como avaliação de risco de transformadores de potência, riscos de

sistemas de automação, ataques cibernéticos, decisões de investimento em projetos e danos causados por terremotos. Além disso, nenhuma das obras considera aspectos relacionados à operação, manutenção e segurança simultaneamente para a preparação das informações para alocação de recursos.

O objetivo deste estudo é desenvolver um método para estimar e reduzir o risco operacional por meio da alocação de recursos financeiros entre subestações de energia, aplicando técnicas de tomada de decisão multicritério. Para atingir esse objetivo, o estudo propõe um método que reduza a subjetividade na avaliação de riscos e elabore as informações para a alocação de recursos.

2.2 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a revisão de literatura relacionada à avaliação de risco em subestações.

É possível apontar que existem, na literatura correlata, temas relacionados à avaliação de risco em sistemas elétricos. Porém, existem poucas publicações no campo da Engenharia de Segurança em eletricidade dedicadas especificamente a avaliação de riscos em subestações de energia.

A literatura correlatada apresenta aplicações de técnicas de tomada de decisão associadas a gestão do risco. Observa-se que em todos os casos as análises são bastante específicas. Além disso, não foram identificados trabalhos que realizem simultaneamente a avaliação de risco e posterior alocação de recursos ou seus déficits no processo de gestão de subestações de energia elétrica.

Nota-se também o envolvimento de especialistas no processo de avaliação.

Neste sentido, o principal fator de originalidade do trabalho aqui proposto está relacionado à possibilidade de realizar adequadamente avaliação, comparação, priorização e ordenação das subestações de energia elétrica de ponto de vista de risco operacional e estabelecer objetivos para alocação de recursos financeiros.

Deste modo, os fundamentos mencionados permitem a proposição de uma metodologia para a análise de problemas de avaliação de riscos em subestações de energia elétrica.

A diferenciação do presente trabalho reside na possibilidade de apresentar uma solução de engenharia funcional e que possa também ser utilizada em outros contextos.

Capítulo 3

Avaliação de Risco

3.1 Conceitos sobre análise de risco

Conforme (BSI, 2018) risco é o efeito da incerteza sobre os objetivos de uma organização. Qualquer situação que desvie destes objetivos pode ser considerada um risco. Em alguns casos é caracterizado pela referência aos eventos potenciais e às consequências, ou combinação destes. Pode ser expresso em termos de uma combinação de consequência de um evento e a probabilidade de ocorrência associada.

Em (ISO, 2018), risco é definido como o efeito da incerteza sobre os objetivos como, por exemplo, financeiros, saúde, segurança e meio ambiente. Tais efeitos geralmente são caracterizados como negativos. Classifica-se o risco em função do potencial do evento e consequência ou a combinação destes. A probabilidade é definida como a chance de algo acontecer e a consequência é o resultado de um evento afetando um objetivo.

Neste estudo adota-se a definição de risco como a combinação da probabilidade de ocorrência de um evento indesejado com a consequência de dano potencial deste evento (lesão ou dano para a saúde de uma pessoa exposta, equipamento ou negócio). Sua representação matemática é definida pela seguinte expressão:

$$R_i = P_i C_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.1)$$

onde R_i corresponde ao valor do risco do i -ésimo evento, P_i corresponde a probabilidade de ocorrência do i th evento, C_i é a consequência do i th evento (NFPA, 2018; BSI, 2018).

A probabilidade pode ser descrita como um número entre 0 e 1 que representa o grau de crença de que o evento ocorrerá e sua consequência é o valor estimado ou pontuação para um determinado resultado (ISO, 2018).

3.2 Matriz de risco

A ferramenta mais usual na mensuração do risco é a matriz de risco onde é possível definir o risco em função da sua probabilidade e consequência (MARKOWSKI e MANNAN, 2008; DUNJO et al., 2010; DUIJM, 2015; LI et al., 2018). A combinação desses parâmetros nos dá a estimativa de risco (DUNJO et al., 2010). A matriz de risco geralmente é dividida em cinco quadrantes (DUNJO et al., 2010). Apresenta-se na Figura 1 um exemplo de uma matriz de risco.

		Consequência				
		Insignificante	Menor	Moderado	Maior	Severo
Probabilidade	Quase certo	Médio	Alto	Alto	Extremo	Extremo
	Provável	Médio	Médio	Alto	Alto	Extremo
	Possível	Baixo	Médio	Médio	Alto	Alto
	Improvável	Baixo	Médio	Médio	Médio	Alto
	Raro	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Médio

Figura 1 – Matriz de risco.

Fonte: Elaborada pelo autor com dados extraídos de (MARKOWSKI e MANNAN, 2008; DUNJO et al., 2010; DUIJM, 2015; LI et al., 2018).

A matriz de risco é geralmente utilizada para priorizar e ordenar medidas de controle de redução de risco nos processos de tomada de decisão (DUIJM, 2015; RUAN et al., 2015; SUTTON, 2015; BAO et al., 2017; ISO, 2018; LI et al., 2018). É considerada de fácil aplicação e interpretação e normalmente é utilizada por pessoas sem experiência em gerenciamento de risco (RUAN et al., 2015; SUTTON, 2015; ISO, 2018; LI et al., 2018).

O modelo de matriz de risco tradicional permite que uma avaliação quantitativa, semi-qualitativa ou qualitativa seja realizada, geralmente com resultados imprecisos devido ao alto grau de incerteza fornecido pelo processo de quantificação de probabilidade e consequência (MARKOWSKI e MANNAN, 2008; DUIJM, 2015; RUAN et al., 2015; SUTTON, 2015; BAO et al., 2017; ISO, 2018; LI et al., 2018).

A matriz de risco é uma ferramenta utilizada para alocar recursos para reduzir riscos (DUIJM, 2015). Devido às suas limitações técnicas, a qualidade da alocação de recursos geralmente fica comprometida. Destaca-se o alto grau de incerteza fornecido pelos modelos tradicionais de matriz de risco, avaliação de risco inadequada pelos participantes (viés cognitivo humano) e integração inadequada de opiniões coletivas durante o processo de avaliação de risco (COX JR, 2008; MARKOWSKI e MANNAN, 2008; BAO et al., 2017).

O erro típico de gerenciamento de risco é gastar todos os recursos financeiros em eventos altamente improváveis, enquanto eventos menos graves e prováveis podem se manifestar (DUIJM, 2015).

Projetar um esquema de classificação, ou seja, determinar o número de classificações usadas em uma matriz de risco e atribuição de classificações diferentes a células diferentes, torna-se um elemento essencial para a construção da matriz de risco. No entanto, a maior parte da literatura relacionada tem se concentrado na aplicação da matriz de risco em vários campos, em vez de pesquisar como projetá-la (LI et al., 2018).

Poucos trabalhos são dedicados a projetar matrizes de risco como, por exemplo, (MARKOWSKI e MANNAN, 2008; DUIJM, 2015; RUAN et al., 2015; SUTTON, 2015; HSU et al., 2016; BAO et al., 2017; LI et al., 2018).

O estudo realizado por (MARKOWSKI e MANNAN, 2008) descreve um procedimento para desenvolver uma matriz de risco *fuzzy*, que pode ser utilizada em diferentes análises de segurança. Realiza-se a *fuzzificação* da frequência e consequência para estruturar as entradas básicas da matriz de risco *fuzzy*. As vantagens do uso da matriz *fuzzy* são apresentadas a seguir:

- A matriz de risco é considerada uma ferramenta útil para realizar avaliações de risco semiquantitativa;
- A abordagem proposta por matrizes tradicionais produz incertezas significativas em relação ao modelo *fuzzy*;
- A matriz *fuzzy* apresenta resultados mais precisos e confiáveis quando comparada aos modelos tradicionais.

De acordo com (COX JR, 2008), as matrizes de risco são populares em aplicações como, por exemplo, análise de risco de terrorismo, gestão de projetos de construção de rodovias, análise de risco de edifícios de escritórios, gestão de risco de mudança climática e gestão de risco empresarial. No entanto, poucas pesquisas validam rigorosamente seu desempenho na melhoria real das decisões de gerenciamento de risco. De acordo com os autores deste trabalho as matrizes de risco possuem as seguintes limitações:

- Resolução deficiente;
- Contribuição errônea nas classificações qualitativas mais altas a riscos quantitativamente menores;
- Alocação de recursos abaixo do ideal;

- Entradas para matrizes de risco (por exemplo, categorizações de frequência e gravidade) e saídas resultantes (ou seja, classificações de risco) requerem interpretação subjetiva, e diferentes usuários podem obter classificações opostas dos mesmos riscos quantitativos.

Essas limitações sugerem que as matrizes de risco devem ser usadas com cautela e apenas com explicações cuidadosas de julgamentos embutidos (COX JR, 2008).

O trabalho proposto por (SMITH et al., 2009) estabelece uma análise estatística aplicando regressão linear, ajuste de distribuição normal e análise Bayesiana com o objetivo de definir traduções sistemáticas de probabilidade objetiva e valor julgado por avaliadores. A aplicação dessas traduções à matriz de risco permite a formação de hipóteses estatísticas de vieses de colocação de pontos de risco. Os dados da matriz de risco gerados pela indústria revelam evidências de vieses no julgamento da probabilidade e consequência, principalmente, centralização da probabilidade, um aumento sistemático na consequência e um viés diagonal. De acordo com os autores, as evidências apresentadas podem melhorar a análise de risco baseada na matriz de risco prevalente na indústria.

De acordo com (DUIJM, 2015), as matrizes de risco são amplamente utilizadas na gestão de risco. Elas são um recurso regular em processos de gerenciamento de risco comumente utilizadas em tomada de decisões. Normalmente são caracterizadas por valores discretos, possuem certa subjetividade em sua escala, limitações quanto a resolução de cada quadrante e não permitem realizar a comparação de vários perigos de forma simultânea.

Em (RUAN et al., 2015), propõe-se uma abordagem para estabelecer matrizes de risco que integrem atitudes de risco com base na teoria da utilidade, como o objetivo de avaliar o risco de forma mais abrangente. Esta abordagem apresenta as seguintes etapas:

1. Descrever as atitudes de risco dos tomadores de decisão por funções de utilidade;
2. Preencher a lacuna entre as funções de utilidade e a matriz de risco por curvas de indiferença de utilidade;
3. Discretizar curvas de indiferença de utilidade.

Este processo utiliza as respostas dos tomadores de decisão aos questionários para formular os valores limites necessários para o estabelecimento da matriz de risco e funções de utilidade, que quantificam efetivamente suas respectivas atitudes de risco. De acordo com os autores os estudos recentes indicam que a ausência de consideração das atitudes de risco dos tomadores de decisão no processo de estabelecimento da matriz de risco vem tonando-se uma limitação significativa.

Em (BAO et al., 2017), apresenta-se uma nova abordagem denominada Abordagem de Atualização Sequencial, para conceber o esquema de classificação de uma matriz de risco de forma viável. A abordagem propõe três princípios e um algoritmo de classificação baseado nesses princípios: consistência fraca ajustada, internalidade consistente e triagem contínua. Um algoritmo de classificação global é proposto para satisfazer os três princípios. Os autores afirmam que sua abordagem possui vantagens em relação a proposta por (COX JR, 2008).

O estudo proposto por (HSU et al., 2016) tem por objetivo avaliar o risco da segurança operacional para mercadorias perigosas em fretes aéreos. Com base na literatura pertinente, os fatores de risco (FR) de segurança operacional foram investigados pela primeira vez. Uma matriz de risco revisada com base em uma versão *fuzzy AHP* foi proposta para avaliar os riscos desses fatores de risco na segurança operacional. Por fim, para validar o modelo, as operações de frete aéreo de mercadorias perigosas em Taiwan foram investigadas empiricamente. Os resultados indicam que os fatores de risco com maior risco nas operações do remetente são declarações imprecisas, conhecimento insuficiente e embalagem insuficiente. Os autores afirmam que resultados contribuem com informações práticas para os operadores de frete aéreo melhorarem o desempenho do gerenciamento de segurança. Além disso, a matriz de risco revisada pode fornecer referência metodológica para pesquisas de avaliação de risco.

3.3 Conceitos sobre avaliação de risco

A avaliação de riscos é um processo analítico que consiste em um número de passos destinados a assegurar que os riscos são corretamente identificados e analisados no que diz respeito à sua consequência e a probabilidade de sua ocorrência (BSI, 2018) e (NFPA, 2018).

Em (AUSTRALIA, 1999), avaliação de riscos é definida como um processo interativo que consiste em passos bem-definidos que, tomados em sequência, apoiam uma melhor tomada de decisão contribuindo com a identificação dos riscos e seus impactos. A avaliação de risco é um processo de gestão que pode ser aplicado em qualquer situação onde possa surgir uma condição inadequada ou resultado inesperado significativo. Os tomadores de decisão precisam saber sobre os possíveis efeitos e tomar medidas para controlar o seu impacto.

Além disso, a avaliação de risco é composta por uma série de processos relacionados a análises do risco, avaliação da magnitude do risco, julgamento sobre se o risco é aceitável ou inaceitável, e criação e avaliação as opções de controle de risco, para atingir esse objetivo. Assim, após os perigos serem identificados no sistema, a probabilidade de ocorrência e a magnitude do dano é determinada, o risco é estimado e as opções de controle de risco são

avaliadas com base nos resultados (DUNJO et al., 2010).

Avaliação de risco desempenha um papel importante nas decisões tomadas por uma organização para implementar políticas de segurança e saúde de forma mais racional (DUNJO et al., 2010).

A avaliação de riscos é reconhecida como parte integrante de uma boa prática de gestão. Tal processo consiste em etapas, que, quando realizadas em sequência, permitem a melhoria contínua na tomada de decisões (AUSTRALIA, 1999).

Em algumas circunstâncias, a avaliação de riscos pode dar cabo à decisão de se proceder a uma análise mais detalhada e estruturada. A avaliação de riscos também pode conduzir à decisão de que não se trata do risco de nenhuma outra forma a não ser mantendo os controles já existentes. Esta decisão será influenciada em maior ou menor grau pela atitude diante do risco da organização e pelos critérios de risco que foram estabelecidos anteriormente (ISO, 2018).

A gestão do risco é o termo aplicado a um método lógico e sistemático que permite estabelecer o contexto, identificação, análise, avaliação, tratamento, monitoramento e comunicação dos riscos associados a qualquer atividade, função ou processo de uma maneira que permitirá que as organizações minimizem as perdas e maximizem os resultados. A gestão de risco atua sobre identificação de oportunidades de forma a evitar ou mitigar perdas (AUSTRALIA, 1999).

A principal finalidade da gestão de riscos é auxiliar na tomada de decisões com base nos resultados, sobre quais riscos necessitam de tratamento adequado e a prioridade para a implementação do respectivo tratamento (ISO, 2018).

Em (ISO, 2018), define-se o termo gestão do risco como a realização de atividades coordenadas para dirigir e controlar uma organização no que diz respeito a risco. Quando implementada e mantida possibilita a uma organização, por exemplo:

1. Elevar a possibilidade de atingir objetivos;
2. Incentivar uma gestão próativa;
3. Atentar-se em identificar e tratar os riscos em toda a corporação;
4. Aprimorar a identificação de ameaças e melhorias;
5. Atender a requisitos legais;
6. Melhorar governança e controles;
7. Melhorar a confiança entre as partes interessadas;
8. Estabelecer uma base confiável para a tomada de decisão e o planejamento;

9. Determinar o emprego de recursos financeiros com maior precisão em função dos custos e da análise de risco;
10. Melhorar os processos operacionais;
11. Minimizar perdas;
12. Melhorar a aprendizagem;
13. Aumentar a resiliência na corporação.

Além disso, a gestão do risco norteia a atuação dos tomadores de decisão para estes realizarem escolhas conscientes, priorizarem ações e distinguirem entre formas alternativas de ação (BSI, 2018).

A identificação de perigos é fundamental para garantir a segurança do projeto e operação de um sistema em plantas de processo e outras instalações. Várias técnicas estão disponíveis para identificar situações perigosas, todas exigindo sua aplicação rigorosa, completa e sistemática por uma equipe multidisciplinar de especialistas. O sucesso se baseia na identificação e subsequente análise de possíveis cenários que podem causar acidentes com diferentes graus de gravidade. Sem um sistema de identificação estruturado, os perigos podem ser ignorados, o que implica avaliações de risco incompletas e perda potencial (DUNJO et al., 2010).

Conforme (NFPA, 2018), a avaliação de riscos em ambientes elétricos inclui uma revisão abrangente dos perigos, das tarefas previsíveis associadas, e das medidas de proteção que são necessárias a fim de manter um nível aceitável de risco. A norma NFPA 70E:2018 estabelece as seguintes etapas para a gestão do risco:

1. Identificação e análise dos riscos elétricos;
2. Identificação de tarefas a serem executadas;
3. Documentação dos perigos associados a cada tarefa;
4. Estimativa do risco para cada par de perigos / tarefa;
5. Determinação das medidas de proteção adequadas para reduzir o nível de risco.

Normas nacionais e internacionais dedicadas a avaliação e gestão do risco elétrico são apresentadas, destacando, (AUSTRALIA, 1999; BSI, 2018; ISO, 2018; NFPA, 2018; MTE, 2019). A aplicação dessas normas e procedimentos permite que melhores práticas e atendimento à legislação sejam implementados simultaneamente.

A legislação sobre segurança elétrica vigente no Brasil determina que em toda e qualquer intervenção em instalações com eletricidade devem ser adotadas medidas preventivas de controle do risco elétrico e de outros riscos adicionais, mediante técnicas de análise de risco, de forma a garantir a segurança e a saúde no desempenho do trabalho (MTE, 2019).

A identificação de eventos indesejáveis e seus efeitos são considerados pontos de atenção para o analista de risco. Esses riscos podem ser de natureza humana (lesão, doença, morte), econômica (perdas de receitas, despesas de capital) ou ambiental (na flora, fauna e ecossistemas), entre outros (SIQUEIRA, 2010; BSI, 2018; NFPA, 2018).

3.4 Técnicas de análise de risco

A literatura existente apresenta métodos tradicionalmente utilizados e que são úteis no processo de avaliação de risco.

3.4.1 Hierarquia de controle de risco

A hierarquia de controle de riscos é um método que visa identificar medidas de controle individuais ou coletivas que permitem eliminar ou reduzir a exposição dos trabalhadores aos perigos. O primeiro passo é eliminar fisicamente os perigos no ambiente de trabalho. Na impossibilidade, a condição indesejada é substituída por outra com menor potencial de risco tolerado, controles de engenharia são implementados para isolar pessoas do risco. Além disso, as medidas administrativas são adotadas e, em última instância, o uso de equipamentos de proteção individual é definido. Todas as etapas desta estratégia são apresentadas conforme a Figura 2 (ISO, 2018; NFPA, 2018).

3.4.2 Avaliação de risco - *National Fire Protection Association (NFPA)*

Em (NFPA, 2015), apresenta-se a mesma metodologia que prioriza a eliminação do risco, substituição dos métodos ou dispositivos, estabelecendo também medidas de controle de engenharia, medidas administrativas, comportamentais e em última instância, propõe a adoção de equipamentos de proteção individual (EPI's) ao trabalhador. Além disso, a observância dos principais modos de falha é estabelecida em seu anexo informativo *F* com intuito de contribuir na gestão do risco.

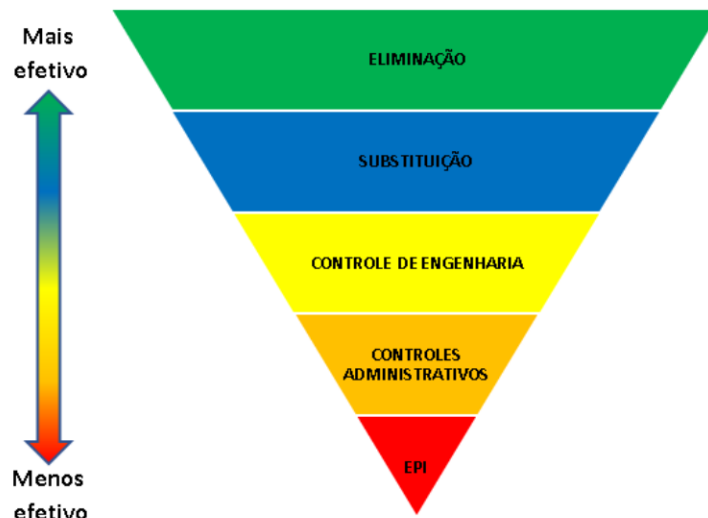


Figura 2 – Hierarquia de Controle de Riscos.

Fonte: Elaborada pelo autor com dados extraídos de (ISO, 2018; NFPA, 2018).

3.4.3 Avaliação de risco ISO-31000-2018

Em (ISO, 2018), a análise de risco é realizada por meio das seguintes etapas:

1. Identificação de riscos (fontes de risco, áreas de impactos, eventos (incluindo mudanças nas circunstâncias) e suas causas e consequências);
2. Análise de risco (desenvolvimento de uma compreensão do risco, entrada para avaliação de riscos e às decisões sobre se os riscos precisam ser tratados, estratégias de tratamento de risco mais adequada e métodos e colaboração na tomada de decisão em função dos diferentes tipos e níveis de risco);
3. Avaliação de risco (auxiliar na tomada de decisão, a partir dos resultados alcançados na análise de risco, sobre quais riscos precisam de tratamento e a prioridade para a aplicação do tratamento);
4. Tratamento de riscos (escolha de uma ou mais opções para modificar riscos). Ao longo destas etapas são estabelecidas medidas de comunicação, monitoramento e avaliação periódica. Esse modelo é amplamente utilizado pelas grandes organizações mundiais.

Essas etapas são representadas conforme a Figura 3. Pode-se notar no decorrer de todo o processo o estabelecimento de ações de comunicação e consulta. Além disso, realiza-se um ciclo ininterrupto de monitoramento e análise crítica (ISO, 2018).

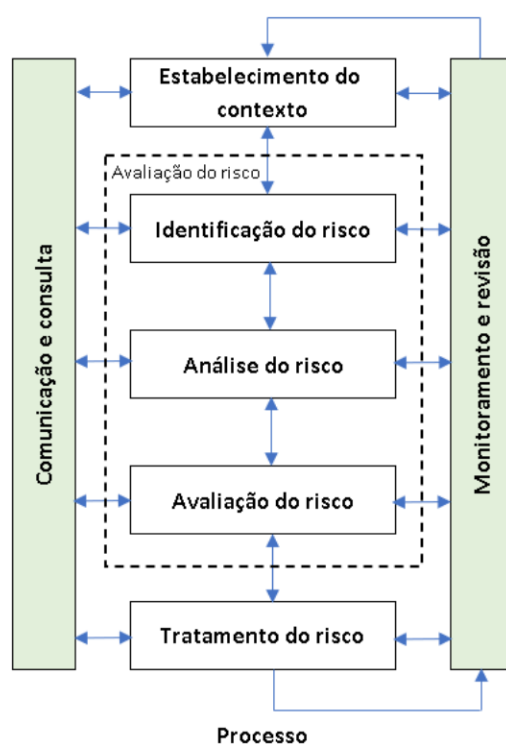


Figura 3 – Processo de avaliação de risco.

Fonte: Elaborada pelo autor com dados extraídos de (ISO, 2018)

3.4.4 *Hazard Identification, Risk Assessment and Risk Control*

Hazard Identification, Risk Assessment and Risk Control (HIRARC) é um processo que permite relatar o risco, analisar, avaliar a magnitude do risco, julgar se é aceitável ou inaceitável e criar e avaliar as opções de controle do risco de forma a atingir o objetivo (SAEDI et al., 2014; ISO, 2019).

O *HIRARC* se caracteriza por uma série de etapas necessárias na identificação dos perigos, realização da avaliação de risco e determinação das medidas de controles. Por meio da identificação das atividades, perigos, consequências, tipos de controles do risco e avaliação da severidade e probabilidade, torna-se possível determinar o risco de cada atividade avaliada. A avaliação dos riscos considera uma matriz composta a partir da probabilidade e consequência. Tal classificação permite realizar a ordenação conforme o grau de risco das atividades. Estas informações são importantes para que se estabeleçam ações preventivas e corretivas de segurança e saúde (SAEDI et al., 2014). As etapas do método são apresentadas conforme Figura 4.

3.4.5 *Bowtie analysis (BTA)*

Bowtie analysis (BTA) é um método probabilístico utilizado pela engenharia para determinar causas e estabelecer medidas de controles. O método é resultado da

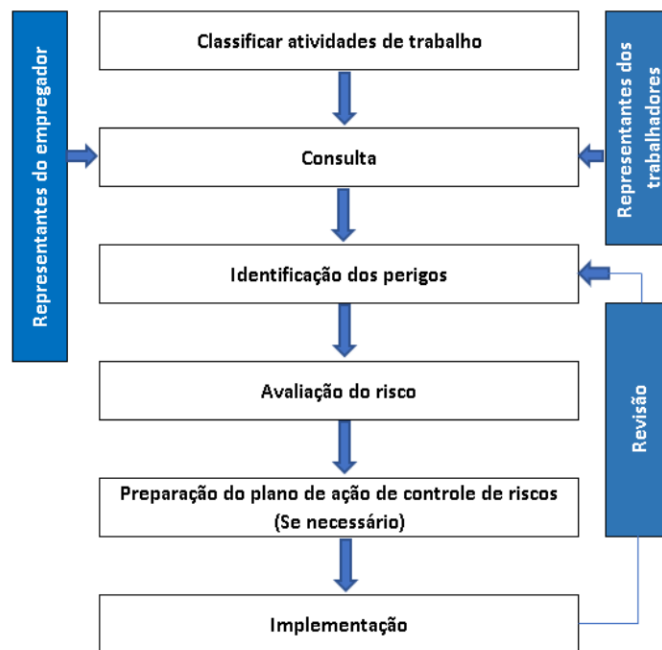


Figura 4 – Hazard identification, risk assessment and risk control model.

Fonte: Elaborada pelo autor com dados extraídos de (SAEDI et al., 2014; ISO, 2019).

combinação de outros dois métodos: *Fault Tree Analysis (FTA)* e *Event Tree Analysis (ETA)*. Utilizam-se as barreiras de segurança tanto para representar as medidas preventivas quanto reativas. A sua representação gráfica é similar ao desenho de uma gravata tipo borboleta, justificando assim, a sua nomenclatura. A Figura 5 representa o modelo proposto (EHLERS et al., 2017).

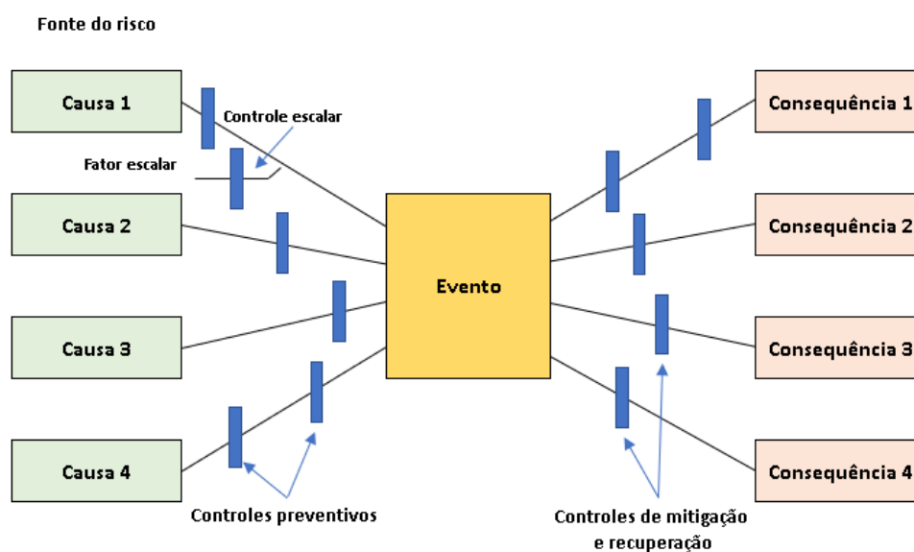


Figura 5 – Diagrama universal *Bowtie*.

Fonte: Elaborada pelo autor com dados extraídos de (EHLERS et al., 2017; ISO, 2019).

3.4.6 *Hazard & Operability Study (HAZOP)*

Hazard & Operability Study (HAZOP) é uma metodologia estruturada que permite examinar um determinado sistema por meio da identificação de perigos potenciais, problemas de operabilidade e efeitos mediante desvios das condições de projeto. O resultado da análise permite determinar as ações de correção para os problemas identificados. O método tem por objetivo eliminar quaisquer possibilidades de acidentes graves e prevenir problemas operacionais (DUNJO et al., 2010; TAYLOR, 2017; ISO, 2019). O estudo de *HAZOP* contempla as etapas seguintes:

1. Determinação do responsável pela condução do processo;
2. Definição dos objetivos e escopo de estudo;
3. Estabelecimento dos objetivos e escopo de estudo;
4. Definição do time multidisciplinar de especialistas;
5. Coleta de documentação exigida;
6. Divisão do sistema, processo ou em elementos menores;
7. Obter concordância do projeto do sistema e subparte aplicando o guia de palavras;
8. Mediante identificação de problemas, definir ações preventivas e corretivas;
9. Registrar as informações e definir ações específicas para tratativa dos riscos identificados.

3.4.7 *Failure Modes, Effects Analysis (FMEA)*

Failure Modes, Effects Analysis (FMEA) é uma técnica que permite identificar pelas quais componentes, sistemas ou processo apresentam falhas mediante funcionamento projetado. A técnica pode ser utilizada nas fases de projeto, fabricação ou operação. A sua aplicação torna-se mais adequada na fase de projeto. *FMEA* possui uma extensão denominada *Failure Modes, Effects Criticality Analysis (FMECA)* cujo o objetivo é realizar o ranqueamento conforme a importância e criticidade (LANNES, 1982; ABDELGAWAD, 2010; FOTUHI-FIRUZABAD et al., 2012; ISO, 2019).

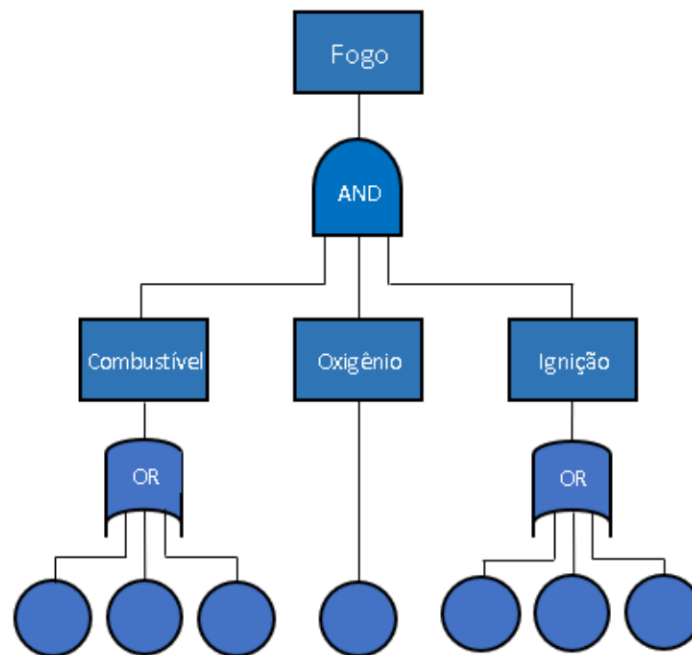
O método *FMEA* possui as seguintes etapas:

1. Definição do escopo e objetivos de estudo;
2. Formação de equipe;
3. Compreensão do sistema a ser estudado;
4. Decomposição dos sistemas em subpartes;
5. Definição da função de cada passo e componente;
6. Para cada componente realizam-se perguntas chave que verificam como cada parte pode falhar, quais mecanismos proporcionam esta falha, seus efeitos, nível de criticidade da falha e sobre a detecção;
7. Identificar dispositivos com possibilidades de falha.

3.4.8 *Fault Tree Analysis (FTA)*

Fault Tree Analysis (FTA) é um método analítico cujo o objetivo é realizar a análises de sistemas complexos aplicando análise probabilísticas de risco como, por exemplo, em sub-sistemas de *software* e *hardware*. A sua análise pode ser quantitativa ou qualitativa e sua representação gráfica é por meio de uma árvore de falha. Esta imagem permite identificar os fatores que afetam a confiabilidade e performance dos sistemas (DAI et al., 2011; JAISE et al., 2013; KANG et al., 2019).

A Figura 6 representa uma árvore de falha composta por símbolos lógicos "*And*" ou "*Or*". Em sua composição pode-se observar um exemplo da forma que ocorre o fogo. Para que ocorra este evento torna-se necessário a existência simultânea do combustível, oxigênio e fonte ignitora ou calor. Para o caso do combustível e ignição podem haver variações quanto ao tipo. Já para o oxigênio não existe tal variação. Por fim, realiza-se uma análise probabilista que permite determinar em qual parte da lógica existe maior vulnerabilidade. A partir desta análise pode-se determinar as medidas corretivas quanto aos riscos identificados (DAI et al., 2011; JAISE et al., 2013; KANG et al., 2019).

Figura 6 – *Fault Tree Analysis*.

Fonte: Elaborada pelo autor com dados extraídos de (JAISE et al., 2013; DAI et al., 2011; KANG et al., 2019).

3.4.9 *Job Safety Analysis (JSA)*

Job Safety Analysis (JSA) é um método concebido para identificar, avaliar e controlar riscos em processos industriais. O seu objetivo é proporcionar procedimentos para a realização do trabalho em segurança. O método utiliza o conceito de consequência e probabilidade para a determinação do risco conforme escalas pré estabelecidas (COLLINS, 2010; ROZENFELD et al., 2010). Esse método possui as seguintes etapas:

1. Dividir o trabalho em etapas e tarefas;
2. Realizar a avaliação de risco incluindo os tipos de acidentes que podem ocorrer em cada etapa e tarefas do trabalho;
3. Estabelecer ações e procedimentos para eliminar ou reduzir o risco.

3.4.10 *Layer of Protection Analysis (LOPA)*

Layer of Protection Analysis (LOPA) é um método semiquantitativo que permite definir os riscos de eventos ou cenários. O resultado dessa análise determina as medidas de controles ou estabelece as ações de mitigação do risco. A Figura 7 representa as camadas a serem estudadas a partir de um exemplo de como ocorre o fogo. Esse método possui as seguintes etapas (MORRISON et al., 2012; FREEMAN, 2013; ISO, 2019):

1. Identificar as causas iniciais do resultado indesejado baseado em análise de suas frequências e consequências;
2. Selecionar um único par de causa e consequência;
3. Identificar e analisar as camadas de proteção;
4. Identificar as camadas de proteção independentes *Independent Protection Layer (IPL)*;
5. Estimar a probabilidade de falha de cada *IPL*;
6. Combinar a frequência da causa inicial com as probabilidades de falha de cada *IPL* e para determinar frequência de ocorrência da consequência indesejada definem-se as probabilidades de quaisquer modificadores condicionais;
7. Determinar a necessidade de proteção adicional por meio do cálculo do risco.



Figura 7 – *Layer of Protection Analysis*

Elaborada pelo autor com dados extraídos de (MORRISON et al., 2012; FREEMAN, 2013; ISO, 2019).

3.4.11 *Delphi*

O projeto denominado *Delphi* é um estudo dedicado ao uso da opinião de especialistas. Criado pela *The RAND Corporation*, tem por objetivo obter o mais alto grau de consenso entre os especialistas participantes.

Desenvolvido para a Força Aérea Americana em julho de 1962 por Norman Dalkey e Olaf Helmer, membros da empresa americana *RAND Corporation*, consiste em obter o maior nível de consenso entre um grupo de especialistas. Os resultados apresentados nesta pesquisa foram divulgados somente dez anos após a sua publicação. Tal fato se deve a confidencialidade envolvida nesse processo (DALKEY, 1963).

O método utiliza avaliações por meio de questionários individuais ou entrevistas. Em seguida tais resultados são confrontados de forma a obter a solução desejada.

O experimento científico foi desenvolvido para determinar a estratégia que possivelmente seria adotada pela União Soviética quanto a sistemas industriais e estimativas de número de bombas. Especialistas foram convidados a dar a sua opinião sobre a probabilidade, frequência e intensidade de possíveis ataques inimigos. Outros especialistas poderiam anonimamente dar o "*feedback*". Este processo foi repetido várias vezes até que foi atingido um consenso.

Sete profissionais formaram o grupo de especialistas, sendo quatro economistas, um físico, um analista de sistema e um engenheiro eletrônico. Essa equipe respondeu cinco questionários em intervalos regulares de uma semana.

As características chaves do método *Delphi* ajudam os participantes a concentrar-se nas questões:

1. Anonimato do participante;
2. Estruturação do fluxo de informações;
3. *Feedback* regular;
4. Papel do facilitador.

3.4.12 *Strategic Options Development and Analysis (SODA)*

Propõe uma maneira de identificar e estruturar preocupações subjetivas em um contexto mais amplo, utilizando-se de mapas mentais para realizar a estruturação. Tem por objetivo a obtenção do consenso do grupo e melhorar o trabalho em equipe. Sua base teórica baseia-se na filosofia, realizando uma auto reflexão e negociação delicada com o facilitador (HJORTS, 2004).

O *Strategic Options Development and Analysis (SODA)* permite que um grupo ou indivíduo construa graficamente uma situação problemática, permitindo assim explorar e analisar opções e ramificações de um determinado sistema complexo, incluindo suas metas e objetivos. Além disso, este método adota técnica de negociação em grupo (HJORTS, 2004). Além disso, o método visa ajudar grupos chegar em um consenso sobre como agir para resolver a situação. O processo *SODA* é destinado a ajudar um grupo a aprender sobre a situação que eles enfrentam antes de chegar a um acordo. O uso de mapa causal leva a uma maior probabilidade de soluções mais criativas e promove soluções exequíveis. A teoria básica que subsidia o método *SODA* deriva da psicologia cognitiva e da negociação social, onde o modelo atua como uma representação em constante mudança da situação problemática (HJORTS, 2004).

3.5 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os principais métodos de avaliação de risco conforme a literatura correlata.

A análise comparativa dos principais métodos de avaliação de risco identificados na literatura permitiu estabelecer as suas características comuns. Observa-se que o princípio básico da análise de risco gira em torno do conceito de probabilidade *versus* consequência.

A matriz de risco é amplamente utilizada na representação gráfica do risco. Observa-se que existem na literatura variações da construção das matrizes de risco, destacando a escala dos quadrantes e eixos. Verifica-se também que poucos trabalhos abordam o tema "construção da matriz de risco", se atendo apenas em sua aplicação.

A definição do grau de risco torna-se importante pois permite estabelecer um ranqueamento e posterior definição de ações mitigadoras do risco. Todos os métodos possuem etapas bem definidas o que permite identificar com maior clareza e assertividade quais são os perigos e medidas de controle.

Os métodos baseados na norma ISO 31000 tem como premissa realizar a eliminação do risco em primeira instância e na impossibilidade, a redução de forma mais eficaz possível. Pode-se afirmar que essa estratégia de eliminação é indiscutivelmente a mais adequada a qualquer processo de gestão do risco. Em situações onde não é possível eliminar o risco se faz necessário estabelecer uma estratégia para a sua redução.

Os métodos *HIRARC*, *BTA*, *HAZOP*, *FMEA*, *FTA*, *JSA*, *LOPA*, *Delphi* e *SODA* apresentam técnicas que contribuem para a identificação de problemas como, por exemplo, falhas de projetos de processos industriais. Dentre as principais características desses métodos destacam-se a possibilidade de identificar os pontos de vulnerabilidade e o estabelecimento das medidas de controle. Nesta pesquisa utiliza-se o conceito sobre risco preconizado nestes métodos.

O *BTA* possui uma característica marcante pois realiza uma análise de controle das barreiras preventivas, bem como as barreiras reativas que atuam pós ocorrência de um determinado evento. Este conceito foi útil para definir duas categorias de critérios: preventivos e reativos, que foram aplicados na etapa de escolha do principais critérios e subcritérios utilizados nesta pesquisa.

Observa-se que todos os métodos se baseiam na opinião de equipe especialista multidisciplinar para realização da análise de risco como, por exemplo, *Delphi* e *SODA*.

Do ponto de vista organizacional os diagramas e representações lógicas adotados nos métodos *BTA* e *FTA* proporcionam uma visão mais detalhada dos possíveis pontos de falhas. Nota-se que esta abordagem é bastante eficiente em situações onde seja necessário aprofundar em aspectos técnicos. Nesta pesquisa optou-se a apresentar uma visão gerencial

das condições operacionais das subestações de energia para realizar alocação de recursos. Desta forma, a aplicação destes métodos para compor a avaliação tornaria inviável visto o tempo a ser desprendido. Ressalta-se que em trabalhos futuros este problema poderá ser trabalhado. Esta estratégia é adotada, por exemplo, pelos métodos *HIRARC*, *BTA*, *HAZOP*, *FMEA*, *FTA*, *JSA*, *LOPA*.

Os estudos teóricos identificados na literatura correlata não permitem que o objetivo desta pesquisa seja atingido, visto que nenhum deles apresenta o foco na avaliação sistêmica de uma subestação de energia elétrica sob o ponto de vista de risco operacional. Por meio da análise dos estudos verifica-se também que a avaliação de risco é realizada de forma estratificada, ou seja, adota-se o fracionamento dos componentes das instalações elétricas e posterior avaliação de cada etapa, parte ou componentes.

Diante do exposto, verifica-se que os métodos e estudos não podem ser aplicados diretamente para resolver a problemática desta pesquisa. Cada um possui pontos positivos que foram aproveitados neste trabalho. O uso de técnicas de avaliação de risco, aplicação de controles ativos e reativos associados a técnicas de tomada de decisão permitiu estabelecer um modelo mais robusto, no que diz respeito ao processo de avaliação de risco de subestações de energia elétrica.

Através da análise dos métodos e literatura relacionada, um modelo de medição de risco para energia subestações é definido. Os conceitos de risco R_i , consequência C_i e probabilidade P_i são considerados para atingir este objetivo. Percebe-se que os métodos existentes são insuficientes para realiza-se uma análise de risco dedicada às subestações de energia elétrica. Eles geralmente são detalhados ou muito superficiais e não retornam os dados necessários para gerar objetivos para a alocação de recursos.

Os resultados alcançados na avaliação de risco permitem a ordenação de subestações de energia por criticidade. Os coeficientes C_i e P_i obtidos na fase de avaliação de risco são utilizados para gerar objetivos para alocar recursos financeiros nas subestações de energia.

O capítulo seguinte engloba conceitos, técnicas e trabalhos relacionados à tomada de decisão multicritério.

Capítulo 4

Tomada de decisão multicritério

Existem duas classes amplas de modelos aplicados na análise multicritério: modelos de tomada de decisão multiobjetivo (em (PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2016, 2019) eles são chamados de modelos $\langle X, F \rangle$) e multiatributo (por exemplo, *AHP*, *MAUT*, e modelos $\langle X, R \rangle$)(PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2016, 2019).

A tomada de decisão multicritério se configura pela ocorrência de critérios múltiplos e divergentes. Os problemas multicritério desta natureza possuem as seguintes características comuns (PEDRYCZ et al., 2011):

1. Múltiplos critérios: cada um dos problemas possui múltiplos critérios, que podem ser objetivos ou atributos;
2. Conflito entre os critérios;
3. Projeto/ seleção: definição de um projeto ou seleção da alternativa mais adequada.

Segundo (EKEL, 1999), diversas manifestações do fator de incerteza são causadas por:

1. Dificuldade de se obter uma quantidade suficiente de informações confiáveis;
2. Falta de previsões confiáveis das características, propriedades e comportamento de sistemas complexos;
3. Objetivos e restrições mal definidos em tarefas de projeto, planejamento, operação e controle;
4. Impossibilidade de formalizar uma série de fatores e critérios;
5. Necessidade de se considerar informações de caráter qualitativo;
6. O relevante papel do fator humano no processo de tomada de decisões.

Desta forma (BERNARDES et al., 2008) afirma que é necessária a abordagem multicritério para resolver:

1. Problemas cujas consequências não podem ser estimadas com um único critério;
2. Problemas que, inicialmente, podem exigir um critério único, mas as suas soluções únicas são inatingíveis, devido à existência de regiões de incerteza na decisão, que podem ser contraídas usando critérios adicionais.

Crítérios são padrões de julgamento ou regras para testar a aceitabilidade em um processo de tomada de decisão. O termo multicritério representa os objetivos e/ou atributos. Os objetivos determinam a direção a ser seguida no processo de tomada de decisão, representados pelos decisores no espaço e tempo. Já os atributos são as características, qualidades ou parâmetros de performance das alternativas e as alternativas são uma de duas ou mais possibilidades pelas quais se pode optar (PEDRYCZ et al., 2011).

Na literatura, diversos métodos são apresentados de forma a apoiar os especialistas nas etapas de identificação, avaliação, comparação, ordenação, priorização e escolha mais racional das alternativas de problemas de tomada de decisão.

4.1 Tomada de decisão em ambiente *fuzzy*

A racionalidade de aplicação dos conjuntos *fuzzy* está associada com o fato de que as informações fornecidas pelo decisor, que normalmente são escassas e incertas, são cruciais na utilização da abordagem multiobjetivo e multicritério. Aqui pode ser muito útil um dos mais importantes aspectos da teoria dos conjuntos *fuzzy*: o aspecto linguístico (PERREIRA JR., 2014).

Há diversos trabalhos relacionados à tomada de decisão multicritério (multiatributo e multiobjetivo) em ambiente *fuzzy*, como por exemplo, (EKEL et al., 2007, 2009; BERNARDES et al., 2009; PARREIRAS et al., 2010; PERREIRA JR., 2014; EKEL et al., 2016; SILVA et al., 2020).

Em (EKEL et al., 2007), utiliza-se a abordagem Bellman-Zadeh para tomada de decisão em ambiente *fuzzy* de forma a se resolver problemas multicritério. O estudo adota procedimentos que consideram as variáveis linguísticas para as condições mais difíceis de formalizar, bem como procedimentos para construir e corrigir vetores de fatores de importância para os objetivos. A aplicação desses procedimentos permite realizar uma abordagem adaptativa para o processamento de informações para fornecer melhorias sucessivas na qualidade da solução. Os resultados obtidos são considerados universalmente aplicáveis. Nesta pesquisa considera-se um Estudo de Caso que envolve problemas multicritério de alocação de escassez de energia e operação do sistema elétrico. Os

resultados apontam a possibilidade de aplicar esses fundamentos em problemas multicritério de sistemas elétricos de potência de despacho de energia elétrica.

Os estudos de (EKEL et al., 2009) apresentam um novo esquema de consenso que tem a intenção de eliminar algumas dificuldades encontradas em aplicações reais. Esta abordagem visa preservar a integridade dos especialistas por meio da intervenção de um moderador, que possui a responsabilidade de supervisionar e mediar as situações conflitantes. Sempre que necessário, o moderador realiza os ajustes de alguns parâmetros do modelo matemático e convida um especialista para atualizar a sua opinião. A utilidade do esquema proposto é demonstrada por meio da resolução de um problema relacionado à uma decisão multicritério envolvendo a metodologia *Balanced Scorecard*, aplicada em um contexto empresarial.

O trabalho proposto por (BERNARDES et al., 2009) adota um novo esquema de consenso para a tomada de decisão em grupo, que permite obter uma opinião coletiva consistente, a partir das informações fornecidas por cada especialista em termos de estimativas *fuzzy* multi-granulares. A sua estrutura baseia-se em modelo linguístico hierárquico com conjuntos multi-granulares de termos linguísticos, sendo a escolha do conjunto mais adequado uma prerrogativa de cada especialista. O método permite que cada especialista utilize termos linguísticos que refletem adequadamente o nível de incerteza intrínseco à sua avaliação. De acordo com o as possíveis fontes de informação e sua incerteza, o moderador pode optar em utilizar três técnicas distintas para aprimorar os resultados. Além disso, é possível expressar a informação linguística em um único domínio, sem perdas de informação, durante o processo de discussão. Esse esquema de consenso é aplicado na análise de um problema de decisão multicritério em ambiente *fuzzy*, gerado com a utilização da metodologia do *Balanced Scorecard* para o planejamento da estratégia empresarial.

A pesquisa realizada por (PARREIRAS et al., 2010) propõe um esquema de consenso flexível para a tomada de decisão em grupo, permitindo obter uma opinião coletiva consistente, a partir das informações fornecidas por cada especialista em termos de estimativas *fuzzy* multi-granulares. O esquema propõe a utilização de uma hierarquia linguística e permite que cada especialista realize a seleção de alternativas, considerando a redução do nível de incerteza intrínseco à sua avaliação. Ao longo do processo de avaliação pode ocorrer a intervenção do moderador. O método calcula o nível de consenso entre os especialistas de forma a elevar a qualidade do processo de tomada de decisão. A pesquisa demonstra a sua eficácia por meio da resolução de um problema hipotético de planejamento de estratégia empresarial, gerado com o uso do *Balanced Scorecard*.

Nos estudos de (PERREIRA JR., 2014) apresenta-se uma solução de problemas de alocação multiobjetivo de recursos (ou suas deficiências) e otimização multiobjetivo da configuração de redes em sistemas de distribuição. Neste caso, se faz necessário balancear a abertura de chaves considerando simultaneamente três critérios: perdas de energia, consumo

de energia de baixa qualidade e número máximo de consumidores por alimentadores. Tal balanceamento é alcançado quando se esgota as possibilidades de melhorias do objetivo, sem que outros objetivos sejam prejudicados. Conceitualmente estas soluções são definidas como soluções não dominadas, soluções eficientes ou soluções Pareto-ótimas.

O Estudo de (EKEL et al., 2016) demonstra as diversas vantagens da aplicação matemática *fuzzy* em problemas de otimização e tomada de decisão de engenharia de energia. Embora o uso de modelos $\langle X, F \rangle$ e $\langle X, R \rangle$ seja de caráter independente, o estudo também afirma que eles também servem como partes de um esquema geral para tomada de decisão multicritério sob condições de incerteza.

Em (SILVA et al., 2020) apresentam-se ferramentas metodológicas para considerar a informação qualitativa na solução de problemas espaciais com sua aplicação particular na determinação de sítios geradores de sistemas de energia renovável. Os autores afirmam que este problema de localização é de natureza complexa e sua solução deve ser capaz de levar em conta uma ampla gama de considerações, bem como avaliações de caráter qualitativo. A importância relativa dos critérios espaciais é estabelecida pelos especialistas envolvidos. Os mapas de decisão resultantes são gerados agregando os critérios espaciais. Esses mapas permitem destacar alternativas de solução racionais por meio de técnicas de modelagem de preferência em um ambiente *fuzzy* (dentro da estrutura dos chamados modelos $\langle X, R \rangle$). O processo de decisão correspondente permite levar em consideração e processar critérios espaciais quantitativos e qualitativos, bem como preferências e julgamentos dos especialistas. Os resultados do trabalho são ilustrados por um Estudo de Caso relacionado à determinação das alternativas locais mais adequadas para usinas renováveis no estado de Minas Gerais, Brasil.

4.2 Modelos $\langle X, R \rangle$ - multiatributo

Tomada de decisão multiatributo é caracterizada por permitir identificar, avaliar, comparar, ordenar, priorizar e realizar a escolha mais racional das alternativas em problemas de tomada de decisão (PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2016, 2019). Essas alternativas são caracterizadas por atributos múltiplos, geralmente, conflitantes (EKEL et al., 2016).

Os problemas de tomada de decisão multiatributos envolvem a seleção da melhor alternativa em um conjunto pré selecionado descritas na forma de atributos (PEDRYCZ et al., 2011).

A opinião de especialistas pode ser utilizada no processo de avaliação de risco. Aplica-se números *fuzzy* trapezoidais com vistas a melhor representar o pensamento humano e reduzir assim a subjetividade das respostas (EKEL et al., 2009).

O uso de um processo sistemático e estruturado pode ser considerado adequado para este contexto. As informações fornecidas pelos especialistas são essenciais para uma boa avaliação de risco. Existem vários métodos formais que utilizam questões apropriadas para extrair a opinião de especialistas. Dentre eles destaca-se o *Delphi*, comparação de pares, avaliação de categorias e julgamentos probabilísticos (ISO, 2018).

4.2.1 *Analytic Hierarchy Process*

O método *AHP* é amplamente utilizado nos processos de tomada de decisão (SAATY, 1980, 1990; PEDRYCZ et al., 2011; SAATY, 2013; ISHAK et al., 2019). O *AHP* consiste em uma análise qualitativa e quantitativa, sistemática e hierárquica. O *AHP* é utilizado em uma variedade de situações de decisão, dentre as áreas de governo, negócios, indústria e educação (ISHAK et al., 2019). O *AHP* considera muitos tipos de dados, incluindo julgamentos baseados nas experiências e valores (PEDRYCZ et al., 2011).

O método consiste em realizar uma modelagem estrutural que em adição a estruturação qualitativa, incorpora estrutura em forma de pesos (SAATY, 2013).

A literatura recente demonstra que o método *AHP* é o mais utilizado para a resolução de problemas de tomada de decisão multicritério em estudos de engenharia elétrica (ILBAHAR et al., 2019). O trabalho proposto por (ILBAHAR et al., 2019) realiza uma revisão de literatura abordando métodos de tomada de decisão multicritério na resolução de problemas de energia elétrica fotovoltaica. Em especial, adota-se o método *AHP* na maioria dos casos analisados.

O método *AHP* possui as seguintes etapas distintas (OHNISHI et al., 2010; VARGAS, 2010; JINGJIANG, 2012):

1. Estruturação do modelo hierárquico, incluindo objetivos, critérios e alternativas. O nível mais alto da hierarquia consiste em um elemento único que é o objetivo geral. Elementos que estão no nível superior são chamados de elementos-pai enquanto aqueles que se encontram no nível inferior são chamados de elementos-filhos;
2. Criação da matriz de comparação em função das respostas do decisor conforme a Tabela 1. Os componentes triangulares superiores da matriz de comparação a_{ij} ($i < j = 1, \dots, n$) são 9, 8, ..., 2, 1, 1/2, ..., ou 1/9. Esses denotam intensidades de importância da atividade i para j . Os componentes triangulares inferiores a_{ji} são descritos com números recíprocos. Além disso, para os elementos diagonais, utiliza-se $a_{ii} = 1$. O tomador de decisão deve fazer comparações $n(n - 1)/2$ pares com n elementos. Essa situação pode ser exemplificada durante a comparação de quatro critérios conforme Tabelas 2 e 3, supondo que critério 1 domina o critério 2;

Tabela 1 – Escala de relativa importância de Saaty

ESCALA	AValiaÇÃO NUMÉRICA	RECÍPROCO
Extremamente preferido	9	1/9
Muito forte a extremo	8	1/8
Muito fortemente preferido	7	1/7
Forte a muito forte	6	1/6
Fortemente preferido	5	1/5
Moderado a forte	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
Igual a moderado	2	1/2
Igualmente preferido	1	1

Fonte: Adaptado pelo autor com dados extraídos de (VARGAS, 2010)

3. Soma dos valores das colunas da Tabela 3. Esse resultado é representado pela Tabela 4;

Tabela 2 – Matriz comparativa

CRITÉRIO	C1	C2
C1	1	Avaliação Numérica
C2	1/Avaliação Numérica (Recíproco)	1

Fonte: Adaptado pelo autor com dados extraídos de (VARGAS, 2010)

Tabela 3 – Matriz comparativa do grupo de critérios

	C1	C2	C3	C4
C1	1	1/5	1/9	1
C2	5	1	1	5
C3	9	1	1	5
C4	1	1/5	1/5	1

Fonte: Adaptado pelo autor com dados extraídos de (VARGAS, 2010)

4. Normalização do grupo de critério dividindo o valor da respectiva posição da Tabela 3 pelo valor da soma da coluna representado na Tabela 4;
5. Cálculo do vetor de *Eigen* é realizado por meio da média aritmética dos valores das linhas da Tabela 5 normalizada. O resultado é representado na Tabela 6. O vetor de *Eigen* possui a finalidade de determinar a participação ou o peso daquele critério no resultado total da meta. Os valores do vetor de *Eigen* representam o peso de cada critério, ou seja, o critério 3 tem 45,71% de importância em relação a meta total. Ele também possui um grau de importância de aproximadamente sete vezes mais na meta final do que o critério 1;

Tabela 4 – Soma das colunas

	C1	C2	C3	C4
Total (Soma)	16,00	2,40	2,31	12,00

Fonte: Adaptado pelo autor com dados extraídos de (VARGAS, 2010)

Tabela 5 – Matriz comparativa normalizada do grupo de critérios

RESULTADOS				
Critério 1	0,063	0,083	0,048	0,083
Critério 2	0,313	0,417	0,433	0,417
Critério 3	0,563	0,417	0,433	0,417
Critério 4	0,063	0,083	0,087	0,083

Fonte: Adaptado pelo autor com dados extraídos de (VARGAS, 2010)

Tabela 6 – Cálculo do vetor de *Eigen* (Média)

VETOR <i>EIGEN</i>	
Critério 1	0,0693 (6,93%)
Critério 2	0,3946 (39,46%)
Critério 3	0,4571 (45,71%)
Critério 4	0,0789 (7,89%)

Fonte: Adaptado pelo autor com dados extraídos de (VARGAS, 2010)

6. Verificação da consistência realizada devido a necessidade de identificar qualquer incoerência durante o processo de comparação dos critérios. É importante ressaltar que se $C1 > C2$ e $C2 > C3$ seria inconsistente afirmar que $C1 < C3$. O cálculo do índice de inconsistência (CI) é realizado por:

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1}. \quad (4.1)$$

onde n é o número de critérios e λ_{Max} é o valor principal *Eigen*.

O λ_{Max} é calculado por meio do somatório do produto de cada elemento do vetor de pelo total da respectiva coluna da matriz comparativa original. Para esse exemplo, o resultado obtido é igual a 4,04.

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} = \frac{4,04 - 4}{4 - 1} = 0,0143. \quad (4.2)$$

7. Verificação da taxa de consistência (CR) é determinada pela equação (4.3);

$$CR = \frac{CI}{RI} \leq 0,1 \sim 10\%. \quad (4.3)$$

onde o valor de RI é determinado conforme o número de critérios. A Tabela 7 define RI em função de n , onde RI é o valor da consistência aleatória.

Tabela 7 – Índices de consistência aleatória (RI)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado pelo autor com dados extraídos de (VARGAS, 2010)

$$CR = \frac{0,0143}{0,9} = 0,0159 = 1,59\%. \quad (4.4)$$

O valor encontrado de CR é satisfatório pois é inferior a 10%.

O Índice de Consistência C_i , λ_{Max} corresponde ao autovalor máximo da matriz A , a corresponde as dimensões da matriz $dim(A) = (axa)$, CR é a Consistency Radio, e RI corresponde ao índice de consistência aleatória das matrizes.

8. Obtenção da prioridade;

9. Tomada de decisão a partir dos resultados obtidos pelo emprego do método *AHP*.

A literatura correlata apresenta diversos trabalhos que aplicam o método *AHP* como, por exemplo, (ZHANG et al., 2009), (RAMALHO et al., 2019; SILVA et al., 2020; RAMALHO et al., 2021).

O trabalho de (ZHANG et al., 2009) apresenta uma análise de risco envolvendo probabilidade de acidentes em tanques petroquímicos. Por meio da utilização de técnicas de tomada de decisão e de uma versão *fuzzy* da Analytic Hierarchy Process, realiza-se a ponderação das opiniões de especialistas para determinar riscos associados a tanques petroquímicos. O Estudo de Caso afirma que o método é capaz de identificar não só o risco, mas também onde deve se fazer as mudanças na proteção e conseqüentemente na confiabilidade dos equipamentos reduzindo os riscos na planta.

Em (SILVA et al., 2020), o método *AHP* é utilizado para determinar o grau de importância dos critérios espaciais relacionados a sistemas fotovoltaicos e eólicos. Os resultados do trabalho visam determinar as alternativas locais mais adequadas para usinas renováveis no estado de Minas Gerais, Brasil.

Os estudos de (RAMALHO et al., 2019) tem por objetivo realizar a alocação multiobjetivo de recursos (ou sua escassez). A solução do problema está associada à extensão do esquema geral de tomada de decisão multicritério sob incerteza. Este esquema é baseado em uma abordagem possibilística e envolve uma generalização baseada em conjuntos *fuzzy* da abordagem clássica para lidar com a incerteza para produzir soluções, incluindo soluções robustas, em análise multicritério. Seu uso, na forma original, ajuda a utilizar ao máximo as informações quantitativas disponíveis para reduzir as regiões de incerteza de decisão. Se a informação quantitativa não conduz a uma solução única, o esquema pressupõe a

aplicação de informação de caráter qualitativo (baseada no conhecimento, experiência e intuição de especialistas) utilizada na fase de decisão final. Em especial, utiliza-se o método *AHP* para determinar os valores dos coeficientes para formar as funções objetivas.

O trabalho de (RAMALHO et al., 2021) tem por objetivo apresentar um método capaz de integrar resultados de priorização de projetos que utilizaram modelos como, por exemplo, Ordenação de Alternativas, Valores de Utilidade, Relações de Preferência Multiplicativas, Estimativas *fuzzy* e Relações de Preferência *fuzzy*. Também são propostas técnicas para garantir a compatibilidade entre os diferentes formatos de preferência e métodos de priorização.

4.2.2 *Multiple Attribute Utility Theory (MAUT)*

A abordagem *Multiple Attribute Utility Theory (MAUT)* pertencente ao grupo de técnicas de avaliação multicritério para tomada de decisão desenvolvido por Keeney e Raiffa em 1976 (RAIFFA, 1968).

O seu objetivo gira em torno da definição dos atributos para o problema de decisão e construir suas funções utilitárias correspondentes e, em seguida, as funções utilitárias de atributos individuais que podem ser integradas em uma função utilitária geral. De forma geral, utiliza-se a função de utilidade aditiva para realizar a integração (HUANG et al., 2013).

A teoria de utilidade tem por objetivo obter julgamentos dos decisores por meio de entrevistas. Durante este processo avaliam-se os diferentes atributos em relação as suas preferências. O método favorece a escolha mais racional mediante um número de alternativas pré definidas (JANSEN et al., 2011).

Em (JANSEN et al., 2011) apresenta-se as etapas preconizadas pelo método *Multiple Attribute Utility Theory*:

1. Definição das alternativas e atributos relevantes para o valor;
2. Avaliação de cada alternativa separadamente em cada atributo;
3. Atribuição de pesos relativos aos atributos;
4. Agregação dos pesos dos atributos e as avaliações de atributo único de alternativas para obter uma avaliação geral das alternativas;
5. Realização de análises de sensibilidade e realização de recomendações.

Ainda em (JANSEN et al., 2011), define-se o significado de cada termo aplicável pelo método *MAUT* conforme representado pela Tabela 8.

Tabela 8 – Significado dos termos do *MAUT*

Concepção	Descrição
Alternativas	Opções que o tomador de decisão deve escolher. Por exemplo: várias habitações disponíveis.
Atributos	Características importantes das alternativas. Por exemplo: “tipo de moradia” e “número de quartos”.
Níveis de atributo	Por exemplo: "2 quartos" é um nível do atributo "número de quartos".
Valor do atributo	O valor numérico anexado a um nível de atributo específico. Um valor mais alto geralmente está relacionado ao de maior atratividade.
Pontuação de importância	Um valor numérico que indica a importância de cada atributo. Uma pontuação mais alta geralmente está relacionada a mais importante.
Peso	Pontuação da importância após a transformação, onde os pesos de cada atributo somados obtêm-se o valor igual a um.

Pode-se definir utilidade como o grau de satisfação que cada escolha pode proporcionar ao tomador de decisão, utilizando o princípio de maximização da utilidade, onde a melhor escolha refere-se a que proporciona mais alta utilidade (JANSEN et al., 2011).

O método *MAUT* é uma técnica padrão para uso em situações de tomada de decisão multicritério, onde os tomadores de decisão são capazes de expressar preferências e tomar decisões efetivas (HUANG et al., 2013).

Devido a sua versatilidade utiliza-se o *MAUT* em diversos contextos de tomada de decisão multicritério como, por exemplo, indústria aeronáutica, projetos e sistemas agrícolas (HUANG et al., 2013).

A simples aplicação da média ponderada associada a avaliadores descomprometidos pode prejudicar o processo de tomada de decisão. Desta forma, é de especial importância ter um método mais eficaz e racional para agregar as preferências individuais dos tomadores de decisão (HUANG et al., 2013).

4.3 Tomada de decisão multiobjetivo

A tomada de decisão multiobjetivo é caracterizada por um tipo contínuo de tomada de decisão multicritério e que precisa atingir objetivos (PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2016, 2019).

Geralmente os objetivos são conflitantes entre si e não comensuráveis (PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2016, 2019). Além disso, é composto por vetor de variáveis de decisão, funções objetivo que descrevem os objetivos (BELLMAN e ZADEH, 1970; PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2016).

Em (EKEL et al., 2007) afirma-se que a incerteza dos objetivos é um tipo importante de incerteza relacionada aos problemas de otimização multiobjetivo. A seguir são apresentadas duas categorias principais de problemas que necessitam de uma abordagem multiobjetivo:

- Problemas em que as consequências da solução não podem ser estimadas com base em um único critério: esses problemas estão associados à análise de modelos, inclusive índices econômicos bem como índices naturais (quando as alternativas não podem ser reduzidas a uma forma comparável) e também pela necessidade de considerar índices cujas estimativas de custos são dificultadas;
- Problemas que, do ponto de vista substancial, podem ser resolvidos com base em um único critério; no entanto, se a incerteza das informações não permitir que se obtenha uma única solução, é possível reduzir esses problemas à tomada de decisão multiobjetivo porque o uso de critérios adicionais (incluindo critérios de caráter qualitativo) podem servir como uma maneira convincente de contrair as regiões de incerteza de decisão.

De acordo com isso, duas classes de modelos (os chamados modelos $\langle X, M \rangle$ e $\langle X, R \rangle$) podem ser construídos. O presente trabalho está relacionado à análise de modelos $\langle X, F \rangle$, quando um vetor de objetivo funções $F(X) = F_1(X), \dots, F_q(X)$ é considerado, e o problema consiste em otimizar todas as funções objetivo, ou seja,

$$F_p(X) \rightarrow \underset{X \in L}{extr}, \quad p = 1, \dots, q, \quad (4.5)$$

onde L é a região factível em R^n .

Conforme (EKEL et al., 2016), tomada de decisão multiobjetivo $\langle X, F \rangle$ visa maximizar ou minimizar as funções. A partir da compreensão discutida em (PEDRYCZ et al., 2011), as questões fundamentais na solução de problemas desta natureza são:

1. Normalização dos critérios: As diferentes funções objetivo possuem escalas com unidades de medidas diferentes que não são comensuráveis. Desta forma, torna-se necessário realizar a normalização, permitindo assim, a comparação entre as funções objetivo. A operação unificada das funções objetivos em uma única escala é chamada de normalização.
2. Escolha do princípio de otimalidade: Define as propriedades da solução desejada e responde em que sentido a solução desejada supera todas as outras soluções possíveis. Além disso, oferece orientações quanto à busca das soluções desejadas. Este princípio é fundamental para a tomada de decisão multiobjetivo.

3. Consideração de preferências da pessoa que toma decisão: Consiste em definir a descrição formal da prioridade e o grau de sua influência na solução do problema multiobjetivo.

Conforme (EKEL et al., 2016), muitos problemas de engenharia de energia devem ser considerados com base em critérios de caráter tecnológico, econômico, ecológico e social.

A otimização de todas as funções de um determinado problema pode ser considerada utópica, ou desta forma não se pode aplicar os conceitos de solução ótima diretamente para os problemas de otimização multiobjetivo. A solução utópica é o conjunto das soluções localmente ótimas (ótimas para cada função) (PEDRYCZ et al., 2011).

A presença de funções conflitantes torna a solução desafiadora para problemas multiobjetivo (PEDRYCZ et al., 2011).

O uso da modelagem por meio de conjuntos *fuzzy* pode contribuir na solução de problemas de tomada de decisão multiobjetivo, visto a existência de restrições e incertezas no processo. Variáveis linguísticas são utilizadas, por exemplo, para definir as restrições, incluindo condições adicionais de caráter quantitativo (PEDRYCZ et al., 2011; PERREIRA JR., 2014).

Os resultados dos trabalhos de (PEDRYCZ et al., 2011; BERREDO et al., 2011) mostram que a análise de modelos $\langle X, F \rangle$ pode ser baseada na abordagem de Bellman-Zadeh (BELLMAN e ZADEH, 1970) para a tomada de decisão em ambiente *fuzzy*.

Sua adaptação e aplicação promove uma maneira construtiva e computacionalmente efetiva para gerar soluções harmoniosas na análise de modelos $\langle X, F \rangle$ (EKEL et al., 2016).

A abordagem de Bellman-Zadeh para tomada de decisões em ambiente *fuzzy* proporciona a preservação natural da incerteza na tomada de decisões multicritério. Além disso, considera índices, critérios e restrições de caráter qualitativo no processo decisório (BELLMAN e ZADEH, 1970; PEDRYCZ et al., 2011; PERREIRA JR., 2014).

Os problemas de otimização multicritério tradicionais possuem limitações técnicas devido a falta de clareza na concepção da "solução ótima". O uso da abordagem de Bellman-Zadeh para a tomada de decisões em ambiente *fuzzy* proporciona um resultado considerado satisfatório e harmonioso. A técnica consiste em definir o "grau de implementação de todos os objetivos", que é utilizado como um critério de otimalidade que concorda com o princípio da garantia do resultado. Além disso, constitui uma linha efetiva na obtenção de soluções harmoniosas (EKEL, 2002), (EKEL et al., 2011; PEDRYCZ et al., 2011; DURBACH e Stewart, 2012; PERREIRA JR., 2014; EKEL et al., 2016).

Uma solução é considerada não harmoniosa quando existe uma satisfação nos resultados do problema de otimização objetivo sem que haja soluções que possuem altos

níveis de satisfação para alguns critérios, mas em contrapartida, possuem baixos níveis de satisfação para outros critérios (EKEL, 2002; PEDRYCZ et al., 2011; PERREIRA JR., 2014; EKEL et al., 2016).

A qualidade da solução é considerada alta se os níveis de satisfação dos critérios forem iguais ou próximos uns dos outros (soluções harmoniosas) se não diferenciarmos a importância das funções objetivo (EKEL e GALPERIN, 2003).

A abordagem de Bellman-Zadeh é considerada eficaz visto a sua eficiência computacional e rigor na obtenção de soluções pertencentes ao conjunto de Pareto durante o processo de análise de modelos multicritérios (PERREIRA JR., 2014; EKEL et al., 2016).

Ao aplicar a abordagem Bellman-Zadeh para a tomada de decisão em um ambiente *fuzzy*, o conceito de "solução ótima" é considerado razoável: o grau máximo de implementação dos objetivos serve como um critério de otimização. Isso está em conformidade com o princípio da garantia do resultado e fornece linhas construtivas na obtenção de soluções harmoniosas com base na análise modelos *maxmin* associados (EKEL et al., 2006).

A abordagem Bellman-Zadeh realiza a substituição de todas as funções objetivo por funções objetivo *fuzzy* ou conjunto *fuzzy*. Considera-se um vetor de funções objetivo da forma $F_p(X), i = 1, \dots, n$, e o problema consiste na necessidade de otimização simultânea de todos esses objetivos (EKEL et al., 2006).

Para esse fim, cada função objetivo $F_p(X)$ deve ser substituída por um conjunto *fuzzy* (EKEL et al., 2006):

$$A_p = \{X, \mu_{A_p}(X)\}, \quad x \in L, \quad p = 1, \dots, q, \quad (4.6)$$

onde $\mu_{A_p}(X)$ é a função de pertinência de A_p .

Uma solução *fuzzy* D com a configuração dos conjuntos *fuzzy* (4.6) é produzida como resultado da interseção $D = \bigcap_{p=1}^q A_p$ com uma função de pertinência

$$\mu_D(X) = \min_{p=1, \dots, q} \mu_{A_p}(X), \quad X \in L. \quad (4.7)$$

Sua aplicação permite obter a solução promovendo a maximização

$$\max \mu_D(X) = \max_{X \in L} \min_{p=1, \dots, q} \mu_{A_p}(X) \quad (4.8)$$

de pertencer a solução *fuzzy* D e reduzindo o problema (4.5) para

$$X^0 = \arg \max_{x \in L} \min_{p=1, \dots, q} \mu_{A_p}(X). \quad (4.9)$$

A determinação da solução representada por (4.9) exige a construção das funções de pertinência $\mu_{A_p}(X)$ $i = 1, \dots, q$ que refletem o grau de otimalidade alcançado por cada objetivo $f_p(X)$, $X \in L$, $p = 1, \dots, q$ (EKEL et al., 2006).

Para obter (4.9), é necessário construir a função de pertinência $A_p(X)$, $p = 1, \dots, q$, refletindo um degrau de conclusão "próprio" ótimo via $F_p(X)$, $X \in L$, $p = 1, \dots, q$. Esta condição é satisfatória utilizando as funções de pertinência

$$\mu_{A_p}(X) = \left[\frac{F_p(X) - \min_{x \in L} F_p(X)}{\max_{x \in L} F_p(X) - \min_{x \in L} F_p(X)} \right]^{\lambda_p} \quad (4.10)$$

para objetivos a serem maximizados ou:

$$\mu_{A_p}(X) = \left[\frac{\max_{x \in L} F_p(X) - F_p(X)}{\max_{x \in L} F_p(X) - \min_{x \in L} F_p(X)} \right]^{\lambda_p} \quad (4.11)$$

para objetivos a serem minimizados (EKEL et al., 2006).

Em (4.10) e (4.11), λ_p , $p = 1, \dots, q$, são os fatores de importância para as funções objetivas correspondentes (EKEL et al., 2006).

A construção de (4.10) e (4.11) demanda para resolver os seguintes problemas:

$$F_p(X) \rightarrow \max_{X \in L}, \quad (4.12)$$

$$F_p(X) \rightarrow \min_{X \in L}, \quad (4.13)$$

propiciando $X_p^0 = \arg \min_{X \in L} F_p(X)$ e $X_p^1 = \arg \max_{X \in L} F_p(X)$, respectivamente.

Uma vez que a solução X^0 deve pertencer a $\Omega \subseteq L$, é necessário construir

$$\bar{\mu}_D(X) = \bigwedge_{p=1}^q \mu_{A_p}(X) \bigwedge \mu_\pi(X) = \min \left\{ \min_{p=1, \dots, q} \mu_{A_p}(X), \mu_\pi(X) \right\}, \quad (4.14)$$

onde $\mu_\pi(X) = 1$ se $X \in \Omega$ e $\mu_\pi(X) = 0$ se $X \notin \Omega$ (EKEL et al., 2006). A maximização de 4.14 é baseada na busca não local que é uma adaptação do método dos "vales longos" (Raskin, 1976).

Os procedimentos para resolução do problema (4.8) discutido em (EKEL et al., 2006) promovem a linha para obter $X^0 \in \Omega \subseteq L$ em acordo com (4.14). Assim, pode-se dizer sobre a equivalência de $\mu_D(X)$ e $\bar{\mu}_D(X)$. Isto permite que se desista da necessidade de implementar um procedimento complicado para construir $\Omega \subseteq L$ (EKEL et al., 2006).

Por fim, a existência de condições adicionais (índices, critérios e/ou restrições) de características qualitativas, definidas por variáveis linguísticas, reduz 4.9 para

$$X^0 = \arg \max_{x \in L} \min_{p=1, \dots, q+s} \mu_{A_p}(X), \quad (4.15)$$

onde $\mu_{A_p}(X)$, $X \in L$, $p = q + 1, \dots, s$ são funções de pertinência de variáveis linguísticas variáveis que refletem esta condição adicional (EKEL et al., 2006).

De acordo com (EKEL et al., 2006) existe uma base que valida a aplicação do min operador. Em contrapartida, existem muitas famílias de agregação de operadores que podem ser utilizadas em substituição do operador min. Considerando isto, é possível generalizar (4.7) conforme a seguir:

$$\mu_D(X) = \text{agg}(\mu_{A_1}(X), \mu_{A_2}(X), \dots, \mu_{A_p}(X)), \quad X \in L. \quad (4.16)$$

Os resultados de (EKEL et al., 2006) demonstram a eficiência do operador min em relação ao operador produto e Boldur's method (abordagem de escalarização) durante o processo de alocação de recursos. Para refletir a qualidade da solução obtida (EKEL et al., 2006) aplicam a seguinte correlação:

$$\Delta(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n | \mu_{A_i}(X) - \hat{\mu}_{A_i}(X) |, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.17)$$

onde $\Delta(X)$ representa a média da magnitude dos valores absolutos dos níveis de derivação da função de pertinência (nível de satisfação) $\mu_{A_i}(x)$ do valor da média $\hat{\mu}_{A_i}(X)$ (EKEL et al., 2006).

Os estudos realizados por (EKEL e GALPERIN, 2003) tem por objetivo resolver problemas de alocação de recursos ou seus déficits. Os autores afirmam que o uso de seus resultados permite melhorar a validade e eficiência na alocação de escassez de energia (real ou associada à utilidade de gerenciamento de carga). Além disso recomendam a aplicação da abordagem para servir como base metodológica e computacional para o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de carga. Por eles destacam a flexibilidade da abordagem na resolução de problemas relacionados à mercado de energia (gerenciamento de mercado de contrato, gerenciamento de congestionamento de transações, entre outros).

Em (EKEL et al., 2006), apresenta-se resultados baseados na abordagem Bellman-Zadeh para tomada de decisão em um ambiente *fuzzy* para solução de problemas de otimização multiobjetivo. O uso da abordagem Bellman-Zadeh serviu como base para resolver um problema de alocação multiobjetivo de recursos (ou sua escassez) e desenvolver um sistema de tomada de decisão interativo adaptativo correspondente, em inglês *Adaptive Interactive Decision-making System (AIDMS1)*. A utilização desses procedimentos permitiu realizar uma abordagem adaptativa ao processamento da informação de um tomador de

decisão para proporcionar melhorias sucessivas na qualidade da solução. Os autores afirmam que os resultados da pesquisa são universalmente aplicáveis e já estão sendo utilizados para resolver problemas de engenharia de energia. O esquema geral proposto por este sistema é descrito a seguir:

1. Solução dos problemas (4.12) e (4.13) para obter $X^0, p = 1, \dots, q$;
2. Construção das funções de pertinência definidas por (4.10) ou (4.11);
3. Construção de um vetor inicial $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_q)$ dos fatores de importância;
4. Análise da disponibilidade de condições iniciais definidas pelas variáveis linguísticas. Se estas não houver condições, vá para o Bloco 8; caso contrário, vá para o Bloco 5;
5. Verificação da compatibilidade das condições iniciais e, se necessário, sua correção;
6. Solução do problema (4.8) com o objetivo de obter X^0 definido por (4.14);
7. Análise da solução atual X^0 . Se o DM estiver satisfeito com a solução, vá para Bloco 10; caso contrário, vá para o Bloco 8, tomando $a := a + 1$;
8. Correção do vetor $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_q)$ dos fatores de importância;
9. Inserção de condições adicionais definidas pelas variáveis linguísticas; em seguida, vá para o Bloco 5;
10. Os cálculos são concluídos porque a solução X^0 é obtida.

Os resultados da pesquisa realizada por (BERREDO et al., 2011) demonstram a eficácia sobre o uso da abordagem Bellman-Zadeh para a tomada de decisão em um ambiente *fuzzy* para a solução de problemas multicritério de engenharia de energia. Soluções harmoniosas são obtidas adotando este tipo de abordagem sendo possível utilizá-la para resolução de problemas de natureza universal. Adotou-se esta abordagem para resolver problemas de natureza de alocação de energia e escassez de energia, operação do sistema de energia, otimização da configuração da rede em sistemas de distribuição e controle de tensão energeticamente eficaz em sistemas de distribuição.

Em (EKEL et al., 2016), soluções baseadas no uso da abordagem de Bellman-Zadeh para tomada de decisão em ambiente *fuzzy* e nas técnicas de modelagem de preferência *fuzzy* são utilizadas para resolver problemas de planejamento e operação de sistemas de energia. Os autores afirmam que existem vantagens na aplicação da abordagem de Bellman-Zadeh e matemática *fuzzy* em problemas de otimização e tomada de decisão. Os resultados são apresentados por meio de um Estudo de Caso.

4.4 Tomada de decisão em grupo

Em tomada de decisão em grupo, torna-se necessário construir uma opinião coletiva do grupo por meio das opiniões individuais e agregação das preferências associadas, com cada critério de decisão, que refletem simultaneamente todos os critérios de forma global. Além disso, as ideias tornam-se menos pessoais e os conflitos gerenciais são minimizados (EKEL et al., 2009).

Existe a necessidade de realizar operações de agregação em processos de decisão multicritério em grupo: construir uma opinião coletiva do grupo por meio das opiniões individuais e agregação das preferências associadas com cada critério de decisão, que refletem simultaneamente todos os critérios de forma global (EKEL et al., 2009).

Estudos realizados no campo da psicologia cognitiva têm mostrado que as decisões tomadas em grupo são mais eficazes devido à capacidade de discussão e envolvimento das pessoas. A realização do trabalho em grupo torna a decisão mais confiável. O trabalho em grupo proporciona uma oportunidade de criação de um ambiente propício para a influência nas mentes das pessoas envolvidas na atividade (BERNARDES et al., 2008; SAATY, 2013).

Conforme (PEDRYCZ et al., 2011), os problemas identificados no processo de decisão em grupo envolvem os seguintes elementos principais:

1. Conjunto de alternativas $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, que é finita, discreta, e contém duas ou mais alternativas;
2. Conjunto de critérios $C = \{C_1, C_2, \dots, C_q\}$, com dois ou mais critérios de natureza quantitativa ou qualitativa;
3. Equipe de especialistas envolvidos no processo de decisão $e = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, que contém dois ou mais profissionais qualificados.

Em (PEDRYCZ et al., 2011) define-se os principais aspectos de tomada de decisão em grupo:

1. Realização de uma determinada tarefa em grupo;
2. A geração de ideias em pró da solução de um objetivo;
3. Os participantes podem estar no mesmo local ou em locais diferentes;
4. Os participantes podem pertencer ou não a uma determinada corporação;
5. O grupo pode ser em qualquer nível gerencial;

6. Ocorrência de opiniões divergentes;
7. Necessidade de realizar a tomada de decisão em um curto prazo.

Em um ambiente onde se dá a tomada de decisão em grupo podem ocorrer situações cooperativas ou não cooperativas. No ambiente cooperativo todos os participantes trabalham em pró de um objetivo comum. Já no ambiente não cooperativo os especialistas desempenham um papel antagônico ou divergente de outro participante (PEDRYCZ et al., 2011).

4.5 Fuzzy Set Based Consensus Scheme

Em (EKEL et al., 2009) define-se esquema de consenso como um termo utilizado para determinar um processo dinâmico e interativo onde os especialistas envolvidos discutem um problema de tomada de decisão. Esse tipo de evento é conduzido por um moderador humano ou artificial, de forma a minimizar as discrepâncias entre as opiniões dos especialistas.

No método de esquema de consenso com base em conjuntos *fuzzy*, (PARREIRAS et al., 2012a) utilizam dos conceitos de relação de preferência *fuzzy* proposto por (ORLOVSKY, 1978). Essa metodologia se vale do uso do consenso por um modo de coordenação que cria uma maneira eficiente de explorar as capacidades de cada membro do grupo em um trabalho cooperativo.

Utiliza-se a teoria de conjuntos *fuzzy* para melhor unificar as opiniões individuais de cada especialista e coletiva do grupo. A grande vantagem em se utilizar tal teoria deve-se ao fato de que ela pode proporcionar a flexibilidade necessária para lidar com os fatores de incerteza inerentes a tais problemas (EKEL et al., 2009).

Além disso, adota-se números *fuzzy* trapezoidais com vistas a melhor representar o pensamento humano e reduzir assim a subjetividade das respostas (EKEL et al., 2009).

Adota-se a modelagem da preferência humana por meio das relações de preferência *fuzzy*, que possibilita a obtenção de soluções satisfatórias mesmo utilizando informações com alto grau de incerteza (EKEL et al., 2009).

A aplicabilidade e a eficiência da metodologia proposta por (EKEL et al., 2009) são demonstradas a partir de um Estudo de Caso relacionado com o planejamento estratégico na empresa de energia elétrica. É importante salientar que a correta representação e o tratamento adequado das incertezas é extremamente relevante para o sucesso da iniciativa estratégica.

Outro aspecto vantajoso da modelagem da preferência humana por meio de relações de preferência *fuzzy* está associado ao fato de que ela oferece diferentes formas

de construir modelos da preferência coletiva a partir das informações fornecidas pelos especialistas (PEDRYCZ et al., 2011).

A literatura atual contém várias estratégias para estender métodos de decisão multiatributo nas configurações do grupo, a fim de obter soluções que refletem a visão coletiva em um problema (EKEL et al., 2009; PEDRYCZ et al., 2011). Aqui, concentrar-se nos métodos de decisão em grupo, especificamente concebidos para trabalharem em um ambiente cooperativo, sem distinguir se o grupo é distribuído espacialmente e temporariamente, bem como com ou sem a estrutura do processo é democrática e hierárquica. Existem métodos que são dedicados ao apoio a tomada de decisão multiatributo (EKEL et al., 2009; PEDRYCZ et al., 2011). Esses adotam três estratégias de tomada de decisão de modo a trabalhar com informações de vários especialistas como:

1. Agregação de avaliações individuais (AIE);
2. Agregação de preferências por critério (AIC);
3. Agregação dos resultados individuais (AIR).

No processo de tomada de decisão em grupo, em determinado momento pode existir a necessidade de se agregarem valores numéricos, a fim de torná-lo possível construir uma solução significativa para o grupo. Dependendo da estratégia escolhida, AIE, AIC, ou AIR, estes valores numéricos são respectivamente associados com estimativas *fuzzy*, relações de preferências *fuzzy* ou a classificação cardinal de cada alternativa, refletida por seus respectivos níveis de não-dominância difusos. Assim, obviamente, cada estratégia envolve peculiaridades que devem ser considerados na escolha de um operador de agregação (PEDRYCZ et al., 2011).

Existem vários operadores de agregação que podem ser implementados para a tomada de decisão em meio aos grupos, com vistas a sintetizar pontos de vista diferentes em uma única opinião. Particularmente, quando AIC e AIR são considerados, mais de um operador de agregação tem sido frequentemente utilizado. Considerando que cada operador de agregação reflete a informação individual de uma maneira diferente, assume-se como parte do problema de decisão em grupo que algumas exigências impostas são para serem satisfeitas pelo operador de agregação, a fim de garantir resultados razoáveis. Em seguida, analisa-se as propriedades de alguns operadores de agregação comuns no âmbito de cada estratégia (PEDRYCZ et al., 2011).

4.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os principais modelos e métodos aplicáveis no processo de tomada de decisão multicritério.

Os métodos de tomada de decisão multicritério possuem características comuns como, por exemplo, o uso de técnicas de normalização.

Quando se realiza a comparação dos principais métodos identificados na literatura recente, verifica-se que o método *AHP* possui ampla aplicação para realizar a ponderação de critérios, alternativas e relevância da opinião de especialistas (ILBAHAR et al., 2019).

A análise comparativa entre os métodos de tomada de decisão demonstrou que o *AHP* é o mais adequado para estabelecer os pesos dos critérios avaliados. Esta escolha deve-se ao fato da possibilidade de realizarmos a decomposição dos pesos de forma hierarquizada. Outro aspecto relevante reside na possibilidade de avaliar a coerência dos julgamentos.

O *AHP* permite representar as preferências dos decisores, principalmente em situações onde predominam restrições qualitativas e o grupo de decisão é composto por indivíduos com interesses e visões divergentes (SAATY, 1980).

Na literatura correlata não foi encontrado um trabalho relacionado à subestações de energia associado ao método *MAUT*.

A revisão de literatura realizada por (ILBAHAR et al., 2019) demonstra estatisticamente os principais métodos de tomada de decisão em estudos de engenharia elétrica. Conforme (ILBAHAR et al., 2019), o método *ELimination and Choice Expressing the REality (ELECTRE)* é o segundo mais utilizado, sendo superado apenas pelo método *AHP*.

Nesse contexto, selecionou-se o método *AHP* para integrar o método ARRS.

Da mesma forma, utiliza-se as opiniões de um especialista para determinar os pesos dos critérios avaliados para melhorar os resultados da avaliação de risco (PEDRYCZ et al., 2011).

Finalmente, a abordagem de Bellman-Zadeh é aplicada para gerar soluções na análise de modelos $\langle X, F \rangle$. A sua seleção para esta pesquisa justifica-se devido a capacidade de gerar soluções harmoniosas para a resolução de problemas multiobjetivos (EKEL et al., 2006; PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2016)

No capítulo seguinte apresenta-se a abordagem de Bellman-Zadeh, métodos baseados em princípios fundamentais de alocação (alocação proporcional, alocação ótima e princípio das prioridades inversas) no contexto de alocação de recursos ou seus déficits.

Capítulo 5

Alocação de recursos - Modelo $\langle X, F \rangle$

5.1 Aspectos gerais

Os métodos existentes de alocação de recursos, baseados em princípios fundamentais de alocação (alocação proporcional, alocação ótima e princípio das prioridades inversas (BURKOV et al., 1981) apresentam desvantagens significativas (PEDRYCZ et al., 2011).

Em (BURKOV et al., 1981; PERREIRA JR., 2014) são demonstrados as principais características dos princípios fundamentais de alocação:

- Alocação proporcional: o consumidor i recebe a quantidade de recurso y_i proporcional a sua demanda d_i :

$$y_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} B, \quad i = 1, \dots, n, \quad (5.1)$$

A aplicação deste princípio tende a gerar uma demanda exagerada dos consumidores em condições onde $\sum_{i=1}^n d_i > B$ ignorando a necessidade de minimizar seus danos.

- Alocação ótima: solução é obtida ao se encontrar o dano integrado mínimo dos consumidores. Em (BURKOV et al., 1981) considera-se a função de dano para um consumidor arbitrário i :

$$r_i = \bar{r}_i \left[\left(1 - \frac{y_i}{m_i} \right)^2 \right], \quad (5.2)$$

onde \bar{r}_i é o máximo valor possível de ser alocado ao consumidor i .

Supondo que $m_i = d_i$, $i = 1, \dots, n$, o centro resolve o problema de alocação ótima maximizando

$$\sum_{i=1}^n r_i(y_i) = \sum_{i=1}^n \bar{r}_i \left[\left(1 - \frac{y_i}{m_i} \right)^2 \right], \quad (5.3)$$

satisfazendo a restrição

$$\sum_{i=1}^n y_i = B. \quad (5.4)$$

Desta forma, a solução do problema é representada pela seguinte expressão:

$$y_i = d_i - \frac{\frac{d_i^2}{\bar{r}_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{\bar{r}_i^2}} \left(\sum_{i=1}^n y_i - B \right). \quad (5.5)$$

Nota-se que a aplicação deste princípio também leva à demanda exagerada dos consumidores (PERREIRA JR., 2014).

- Princípio das prioridades inversas: dano mínimo do i -ésimo consumidor é \bar{r}_i e $m_i = d_i$, $i = 1, \dots, n$. Neste caso:

$$y_i = \min \left\{ d_i, \frac{\frac{\bar{r}_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{r}_i}{d_i} \right)} B \right\}. \quad (5.6)$$

Observa-se que o princípio de prioridades inversas força os consumidores a diminuir suas demandas (PERREIRA JR., 2014).

Os princípios de prioridade citados anteriormente não estimulam os consumidores a demonstrarem demandas objetivas e bem fundamentadas, a não previsão de influência para os consumidores e considera as diversas consequências que não podem ser representadas por funções de danos tradicionais (PERREIRA JR., 2014).

Eles poderiam ser eliminados por meio de uma abordagem multicritério, que permite considerar e maximizar diversas consequências positivas ou minimizar diversas consequências negativas da alocação de recursos ou de seus déficits (EKEL et al., 2006).

Os primeiros resultados nesta área estão relacionados à resolução do conjunto de problemas de alocação de déficits de potência e energia para diferentes níveis de hierarquias territoriais, temporais e situacionais de gerenciamento de carga, gerados pelos impactos do desastre de Chernobyl (SKLYAROV et al., 1987).

Em (P. Y. EKEL et al., 2000) apresenta uma solução para o problema de alocação de recursos de potência e escassez de energia. Por meio da abordagem Bellman-Zadeh para tomada de decisão em um ambiente *fuzzy*, realiza-se o gerenciamento de carga. Os resultados do estudo são desenvolvidos dentro da estrutura de um sistema de tomada de decisão interativo adaptativo, que pode ser utilizado na alocação de diversos tipos de recursos ou de sua escassez.

A pesquisa realizada por (SAATY et al., 2003) ressalta a aplicabilidade da programação linear em problemas de alocação de recursos. Destaca-se neste estudo os aspectos relacionados à atributos intangíveis aplicados no processo de alocação de recursos. O estudo também demonstra a eficiência do método *AHP* na resolução de problemas envolvendo questões de intangibilidade dos atributos.

Os autores de (SAATY et al., 2007) utilizam a combinação de programação linear e *AHP* para otimizar os problemas de alocação de recursos humanos. As prioridades das alternativas são utilizadas como coeficientes da função objetivo de um problema de programação linear. O uso combinado da programação linear e *AHP* permitiu reduzir a subjetividade no processo de alocação de recursos humanos.

O estudo publicado por (RAMALHO et al., 2019) tem por objetivo gerar soluções multicritério robustas, através da construção de combinações representativas de dados iniciais, estados de natureza ou cenários com uso de informações qualitativas. Considera-se a possibilidade de especialistas utilizarem diversos formatos de preferência processados por funções de transformação, apresentadas juntamente com informações quantitativas, realizando um processo de combinação de informações dentro dos modelos de tomada de decisão multiobjetivos. Os autores afirmam que os resultados correspondentes são de caráter universal e aplicáveis a diversas classes de problemas multiobjetivos. O trabalho propõe uma nova abordagem para a formulação homogênea e aceitável por especialistas de objetivos de alocação específicos. Os resultados do estudo são apresentados por meio de um Estudo de Caso, cuja a ideia fundamental é a construção dos cenários com base nas informações qualitativas.

É fácil notar que a satisfação dos objetivos relacionados à alocação multiobjetivo de recursos está associada à maximização ou minimização das funções objetivo lineares (SKLYAROV et al., 1987; RAMALHO et al., 2019):

$$F_p(X) = \sum_{i=1}^n c_{pi}x_i, \quad p = 1, 2, \dots, q, \quad (5.7)$$

onde x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ são as variáveis, que correspondem aos volumes de recursos buscados destinados ao i -ésimo consumidor; c_{pi} , $p = 1, 2, \dots, q$, $i = 1, 2, \dots, n$ são indicadores específicos, que correspondem ao p -ésimo objetivo específico, para o i -ésimo consumidor.

Ao mesmo tempo, a satisfação dos objetivos no caso de alocação multiobjetivo de déficits de recursos está associada à maximização ou minimização das funções objetivo lineares:

$$F_p(\Delta X) = \sum_{i=1}^n c_{pi} \Delta x_i, \quad p = 1, 2, \dots, q, \quad (5.8)$$

onde Δx_i , $i = 1, 2, \dots, n$ são as variáveis, que correspondem aos volumes de limitações de recursos buscados destinados ao i -ésimo consumidor.

As funções objetivo (5.7) e (5.8) não são o único tipo de funções objetivo, que pode ser usado na alocação multiobjetivo de recursos ou seus déficits. Em particular, em (SKLYAROV et al., 1987), outros tipos de funções objetivo (linear, fracionário, quadrático, etc.) são considerados; às vezes, elas podem refletir melhor a essência de objetivos específicos. Em (EKEL et al., 1998) apresenta a expressão que define a região factível como:

$$L = \left\{ x \in \mathbf{R}^n \mid 0 \leq x_i \leq B_i, \sum_{i=1}^n x_i = B \right\}. \quad (5.9)$$

onde $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ é um vetor de limitações a serem alocadas aos consumidores, B_i é o valor permissível de limitação para o i -ésimo consumidor, enquanto B é o valor total de limitações a ser alocado.

5.2 Alocação de recursos ou seus déficits e escassez

Três modelos de alocação de recursos ou seus déficits e escassez são considerados em (RAMALHO et al., 2019):

5.2.1 Alocação de recursos disponíveis

Temos demandas D_i , $i = 1, 2, \dots, n$, dos consumidores e um recurso total disponível $RT < \sum_{i=1}^n D_i$. Então, o problema exhibe a seguinte estrutura:

$$F_p(X) \Rightarrow \max_{X \in L} \text{ or } \min_{X \in L}, \quad p = 1, 2, \dots, q \quad (5.10)$$

sujeito às restrições

$$0 \leq x \leq D_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.11)$$

e

$$\sum_{i=1}^n x_i = RT. \quad (5.12)$$

5.2.2 Alocação de escassez de recursos com cortes não limitados

As demandas $D_i, i = 1, 2, \dots, n$ dos consumidores são dadas e um recurso total disponível é $RT < \sum_{i=1}^n D_i$. Então, o déficit de recursos é $A = \sum_{i=1}^n D_i - RT$, e o problema tem a seguinte estrutura:

$$F_p(\Delta X) \Rightarrow \max_{X \in L} \text{ or } \min_{X \in L}, \quad p = 1, 2, \dots, q \quad (5.13)$$

sujeito às restrições

$$\Delta x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.14)$$

e

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = A. \quad (5.15)$$

5.2.3 Alocação de escassez de recursos com cortes limitados

Temos demandas $D_i, i = 1, 2, \dots, n$, bem como demandas minimamente aceitáveis $D_i^m, i = 1, 2, \dots, n$ dos consumidores. O problema é alcançar (5.13), levando em consideração as restrições:

$$0 \leq \Delta x_i \leq A_i = D_i - D_i^m, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5.16)$$

e (5.15).

5.3 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos relacionados à alocação de recursos.

Observa-se que a utilização dos princípios de alocação proporcional, alocação ótima e princípio das prioridades inversas geram resultados insatisfatórios. A aplicação pode levar à demanda exagerada dos consumidores, proporcionando resultados dos problemas de alocação de recursos.

As primeiras tentativas de usar a abordagem multicritério para a alocação de recursos em problemas de déficits de potência e energia foi motivada pelo acidente nuclear

de *Chernobyl* na antiga *URSS*. É possível perceber a relevância deste tipo de abordagem visto a complexidade do processo de tomada de decisão envolvido.

A abordagem modificada de Bellman-Zaded é utilizada em diversos processos de tomada de decisão. A sua utilização proporciona soluções mais harmoniosas e contribui na redução das incertezas. Neste sentido, adota-se esta abordagem nesta pesquisa para resolver o problema de alocação de recursos.

Seleciona-se o modelo 1 proposto por (RAMALHO et al., 2019) para resolver o problema de alocação de recursos devido as suas particularidades serem adequadas para resolver o problema de alocação de recursos.

Diante do exposto, apresenta-se no capítulo seguinte a proposição de uma metodologia que realiza a integração de conceitos de risco e tomada de decisão para geração de objetivos para alocação de recursos financeiros.

Capítulo 6

Metodologia Proposta

Esta seção demonstra a metodologia proposta com base na aplicação da teoria de riscos e técnicas de tomada de decisão.

Apresenta-se uma metodologia que tem por objetivo melhorar a qualidade da estimativa de risco operacional de subestações de energia utilizando modelos e métodos de tomada de decisão multicritério.

O método denominado Análise de Redução de Risco Sistêmica (ARRS) proposto a seguir define a estratégia para atingir este objetivo.

O método tem por objetivo reduzir a subjetividade da avaliação de risco e elevar a qualidade das decisões relacionadas à alocação de recursos entre subestações de energia.

A aplicação da modificação da abordagem de Bellman-Zadeh para a tomada de decisão em ambiente *fuzzy*, fornece soluções multicritério harmoniosas conforme discutido na seção 4.3.

O método propõe a construção de uma matriz de risco integrada ao método *AHP* para determinação dos níveis de risco das subestações de energia em estudo, de forma a definir os montantes de recursos financeiros a alocar de acordo com objetivos vinculados à matriz de risco.

A aplicação dos passos preconizados pelo método ARRS permite gerar os objetivos e realizar a alocação dos recursos financeiros a ser utilizado na gestão da manutenção das subestações de energia.

O método ARRS integra conceitos de avaliação de risco e técnicas de tomada de decisão multicritério para alocação financeiros para realizar a gestão da manutenção das subestações de energia.

6.1 Análise de Redução de Risco Sistêmica - ARRS

O método ARRS possui os seguintes passos:

Passo (1) Seleção das subestações de energia a serem avaliadas para a alocação de recursos financeiros. A aplicação do modelo 1 definido em (RAMALHO et al., 2019) preconiza a definição do número de subestações para realizar a alocação de recursos.

Passo (2) Definição do grupo de especialistas responsáveis pela estruturação do modelo de avaliação de risco. De acordo com (PEDRYCZ et al., 2011) a realização do trabalho em grupo minimiza erros e inibe avaliações individuais tendenciosas. A literatura correlata apresenta estratégias para aprimorar esta avaliação conforme preconizado na seção 4.4. Neste estudo específico optou-se a não aplicá-las em função da necessidade de deixar o processo de avaliação mais ágil.

Passo (3) Definição dos critérios e subcritérios relevantes para compor a avaliação do risco operacional das subestações de energia (GILL, 2008; SOUSA, 2010; INTERNATIONAL, 2012; NFPA, 2015; MCDONALD, 2016; ISO, 2018, 2019). A seleção dos critérios e subcritérios também considera os conceitos preconizados pela hierarquia de controle de riscos (NFPA, 2018) e nas necessidades específicas da empresa. Além disso, critérios e subcritérios com características reativas e preventivas foram considerados nesta estruturação. Os métodos *BTA* e *FTA* discutidos na seção 3.4 adotam estratégia similar.

Passo (4) Classificação dos critérios de acordo com os objetivos: consequência C_i ou probabilidade P_i . A partir dessa classificação, é possível construir a hierarquia para cada eixo da matriz de risco. Estudos e normas sobre risco utilizam dados de consequência e probabilidade para estimar o valor do risco como, por exemplo, (DUIJM, 2015; NFPA, 2018; BSI, 2018; ISO, 2018). Ressalta-se que métodos de avaliação de risco apresentados na seção 3.4 utilizam este conceito para obtenção da estimativa do risco. Para a composição da alocação de recurso torna-se necessário definir os objetivos conforme definido pelo modelo 1 apresentado por (RAMALHO et al., 2019) na seção 5.

Passo (5) Integração dos critérios e subcritérios respeitando a hierarquia proposta pelos especialistas. Esta estratégia de decomposição hierárquica é inspirada no método *AHP* (SAATY, 1980).

Esta pesquisa define um modelo de integração entre a matriz de risco, critérios, subcritérios e seus respectivos pesos. Um exemplo de modelo mental desta hierarquia é ilustrado na Figura 8. Para a sua construção, recomenda-se limitar-se em cinco subcritérios por critério, dada a complexidade envolvida em fazer as comparações e obter um julgamento coerente pelo método *AHP* (SAATY, 1980, 1990, 2013; ISHAK et al., 2019; LYU HAI-MIN et al., 2020).

Devido à grande quantidade de componentes existentes em uma subestação de

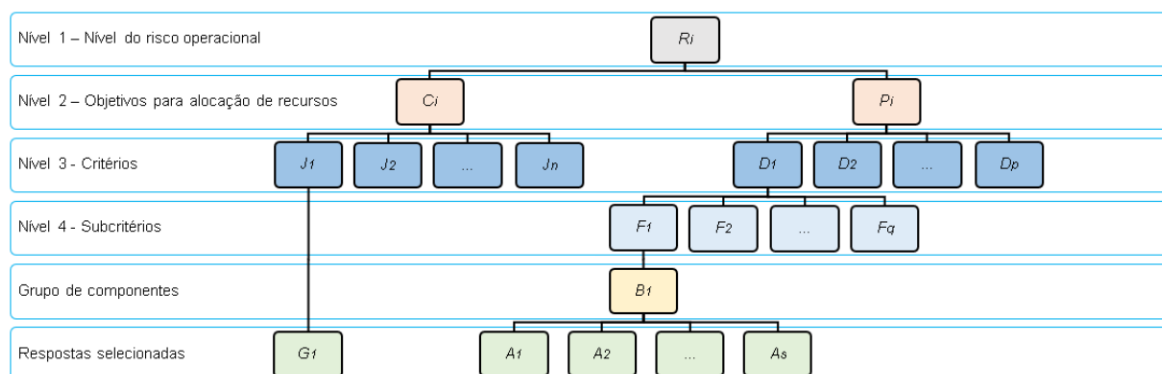


Figura 8 – Modelo mental da hierarquia matemática.

Fonte: Elaborada pelo autor fundamentados em (SAATY, 1990; ZHANG et al., 2009; SAATY, 2013; EHLERS et al., 2017; ISO, 2018).

energia elétrica, torna-se necessário subdividi-la em s grupos de componentes de forma a realizar uma avaliação do risco operacional. Cada grupo de componentes está vinculado aos subcritérios relacionados à probabilidade.

É importante ressaltar que realizar a avaliação completa de cada item da subestação pode ser considerado inviável, visto o exposto acima e ao tempo necessário para a sua execução. Neste sentido, os critérios e subcritérios selecionados possuem características sistêmicas que definem o grau de conformidade por processo. Além disso, as subestações normalmente não possuem banco de dados suficientes e/ou confiáveis para serem utilizados como, por exemplo, em sistemas de inteligência artificial. A base histórica de cada subestação normalmente fica na memória dos profissionais ou armazenadas em arquivos não acessíveis. Basta somente a troca de um membro da equipe para que parte das informações relevantes sejam automaticamente perdidas.

Com o desenvolvimento tecnológico e a adoção das melhores práticas de ativos pode-se, em um futuro próximo, minimizar este tipo de problema. Até que isso seja resolvido, o uso técnicas fundamentadas que contemplem o conhecimento dos profissionais que atuam nas subestações serão de fundamental importância para solucionar o problema de alocação de recursos baseados na avaliação do risco operacional.

Passo (6) Definição dos pesos dos critérios e subcritérios. Nesta fase, os especialistas comparam os grupos de critérios ou subcritérios no mesmo nível e definem uma opinião coletiva. Os estudos (por exemplo, (EKEL et al., 2009; PARREIRAS et al., 2010; RAMALHO et al., 2019)), utilizam a opinião coletiva para resolver problemas de tomada de decisão. Esta medida estabelece uma relação coerente entre os pesos de cada critério e subcritério existentes nos diversos níveis. Além disso, possibilita que eles sejam adequadamente ponderados conforme a sua relevância (SAATY, 1980, 1990, 2013). A determinação dos valores de peso de cada critério de consequência (ω_j) e probabilidade (ω_k) ou subcritério

de probabilidade (ω_j^k) são obtidos aplicando os conceitos recomendados pelo método *AHP* (SAATY, 1980, 1990, 2013). Revisões de literatura demonstram que o método *AHP* é adequado para determinar os valores de peso (por exemplo, (ILBAHAR et al., 2019)). A seção 4 demonstra os principais métodos de tomada de decisão existentes e mediante a análise comparativa conclui-se que o método *AHP* é o mais adequado para obtenção dos pesos. A justificativa gira em torno de sua eficiência na obtenção de valores de pesos. Além disso, em uma etapa final o método possibilita analisar a qualidade da avaliação realizada pelos especialistas (SAATY, 1980, 1990, 2013).

Passo (7) Elaboração de questionário contemplando as perguntas e respostas relacionadas à cada critério ou subcritério. Neste questionário considera-se também a inserção dos s grupos de componentes definidos pelos especialistas. A aplicação de questionário como extratécia de coleta de dados é utilizada no método *DELPHI* discutido na seção 3.4.11.

De acordo com a resposta selecionada obtém-se uma pontuação A_h (nível de escala linguística) para avaliações relacionadas à probabilidade e G_j (nível de escala linguística) para avaliações relacionadas à consequência. Para perguntas com três ou cinco opções de resposta, uma escala linguística é aplicada (0,1, 0,5 ou 1,0) ou (0,1, 0,2, 0,4, 0,6 ou 1,0), respectivamente. Diversos trabalhos utilizam escalas linguísticas em processos de tomada de decisão como, por exemplo, (EKEL et al., 2009; PARREIRAS et al., 2010, 2012b; EKEL et al., 2016; RAMALHO et al., 2019). Todas as opções de respostas são previamente conceituadas pelos especialistas com o objetivo de reduzir a subjetividade no processo de avaliação de risco operacional (PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2019).

As escalas linguísticas definidas no questionário representam o nível de probabilidade e impacto operacional por critério ou subcritério. Quanto maior o valor de escala, maior a contribuição para o risco operacional.

Para cada grupo de critérios (ω_j e ω_k) ou subcritério (ω_j^k), a soma dos pesos é limitada de acordo com as seguintes expressões:

$$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1, \quad (6.1)$$

$$\omega_j \geq 0, \quad (6.2)$$

onde ω_j corresponde ao valor do peso do j -ésimo critério,

$$\sum_{k=1}^p \omega_k = 1, \quad (6.3)$$

$$\omega_k \geq 0, \quad (6.4)$$

onde ω_k corresponde ao valor do peso do k -ésimo critério,

$$\sum_{f=1}^q \omega_f^k = 1, \quad \forall k = 1, 2, \dots, n, \quad (6.5)$$

$$\omega_f^k \geq 0, \quad (6.6)$$

onde ω_f^k corresponde ao valor do peso do f^k -ésimo subcritério do k -ésimo critério.

Diversos estudos como, por exemplo, (PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2019) utilizam o somatório dos pesos igual a um.

Passo (8) Aplicação de questionário por meio de entrevistas e avaliação em campo das n subestações de energia elétrica. Realização de entrevistas e o uso de questionários é uma prática utilizada para se obter as informações desejadas de forma mais organizada e objetiva (DALKEY, 1963; HUANG et al., 2013; JANSEN, 2011; LYU HAI-MIN et al., 2020; ZARTHA et al., 2019).

Passo (9) Integração dos pesos dos critérios e subcritérios com as avaliações A_h e G_j (respostas às questões relacionadas à probabilidade e consequência, respectivamente) realizadas na etapa anterior. O seu cálculo permite obter o valor do risco operacional R_i (DUIJM, 2015; NFPA, 2018; BSI, 2018; ISO, 2018). Nesta etapa, é calculado

$$B_f = \sum_{h=1}^s A_h, \quad f = 1, 2, \dots, q, \quad (6.7)$$

onde B_f representa o somatório dos valores obtidos na avaliação de cada pergunta A_h do h -ésimo grupo de componentes, do f -ésimo subcritério.

$$F_f = \frac{\omega_f^k B_f}{s}, \quad f = 1, 2, \dots, q, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (6.8)$$

representando o resultado da avaliação do f -ésimo subcritério multiplicado pelo peso ω_k do f -ésimo subcritério referente ao k -ésimo critério e dividido pela quantidade de s grupos de componentes.

É possível calcular a soma dos indicadores F_f do q -ésimo subcritério pertencente ao nível 3 da seguinte forma:

$$K_k = \sum_{f=1}^q F_f, \quad k = 1, 2, \dots, p. \quad (6.9)$$

Calculando

$$D_k = \omega_k K_k, \quad k = 1, 2, \dots, p, \quad (6.10)$$

para o k -ésimo critério pertencente ao nível 2, é possível obter

$$P_i = \sum_{k=1}^p D_k, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.11)$$

da Equação (3.1), que deve ser usada na alocação de recursos entre subestações.

O uso de J_j é calculado como

$$J_j = \omega_j G_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6.12)$$

permite obter C_i conforme a apresentado a seguir:

$$C_i = \sum_{j=1}^n J_j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6.13)$$

Passo (10) Realização da comparação, ordenação e/ou priorização das n subestações de energia, analisando os valores de R_i (NFPA, 2018), (BSI, 2018). O cálculo do valor do risco é obtido pela aplicação da expressão 3.1.

Utiliza-se a matriz de risco para representar o resultado obtido. A sua estrutura 5x5 proposta nesta pesquisa é fundamentada conforme os estudos de (DUIJM, 2015; LI et al., 2018).

A Figura 9 apresenta a matriz de risco construída para este fim. Observa-se que o valor matemático de cada quadrante é composto pela multiplicação entre o eixo x e y , que variam de 0 a 1. Quanto maior for o valor desta multiplicação maior será o valor do risco R_i .

		Consequência				
		1	0.8	0.6	0.4	0.2
Probabilidade	1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
	0.8	0.16	0.32	0.48	0.64	0.8
	0.6	0.12	0.24	0.36	0.48	0.6
	0.4	0.08	0.16	0.24	0.32	0.4
	0.2	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2
		0.2	0.4	0.6	0.8	1

Figura 9 – Matriz de risco numérica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O procedimento de avaliação de risco operacional é repetido para as n subestações de energia elétrica.

Passo (11) Realização da alocação dos recursos financeiros disponíveis entre as n subestações de energia elétrica. As etapas para obter a alocação de recursos são elencadas na seção 5, incluindo as expressões preconizadas pelo modelo 1 definidas em (RAMALHO et al., 2019). Nota-se que é necessário definir o objetivo de redução de risco e estabelecer as demandas D_i necessárias para atingir esta meta para definição das restrições. Por fim, também é necessário conhecer o valor do investimento disponível RT .

O método ARRS é ser representado pelo fluxograma ilustrado na Figura 10. Nota-se ele possui onze etapas que orientam o moderador em sua utilização. Além disso, é possível observar as teorias e métodos utilizados em sua estruturação. Por fim, destaca-se a análise final necessária para inclusão ou não de investimentos futuros para redução do risco operacional em subestações de energia elétrica.

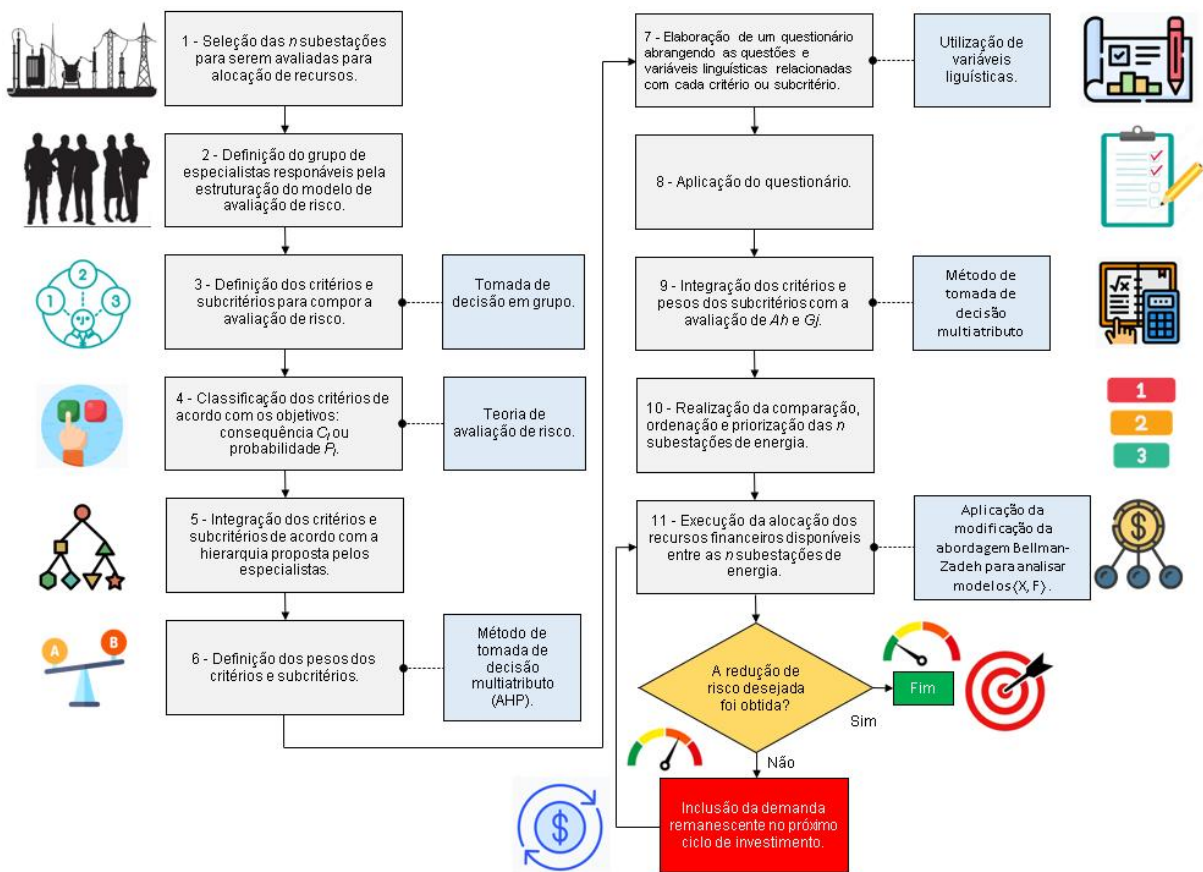


Figura 10 – Fluxograma do modelo ARRS.

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2 Considerações finais

Diante do exposto, foi possível elaborar o método Análise de Redução de Risco Sistêmica. A combinação de técnicas de tomada de decisão associadas as de avaliação de risco permitiu atingir o objetivo proposto.

Considera-se relevante o fato de que cada critério e subcritério pode receber o a ponderação mais adequada ao contexto da avaliação de risco. Essa medida permite equilibrar o resultado da avaliação de risco e reduzir a super ou sub estimação de um determinado critério.

Outro ganho está relacionado com a possibilidade de customização dos pesos conforme o entendimento de cada grupo de avaliadores. Em cada contexto pode-se haver necessidades diferentes, obrigando os participantes a valorizarem um determinado critério.

O participação de profissionais especializados tando na definição dos critérios quanto na realização da ponderação permitiu elevar a qualidade do resultado da avaliação, minimizando erros durante esta avaliação. Além disso, o trabalho em grupo inibe a realização de avaliações tendenciosas devido aos interesses individuais (PEDRYCZ *et al.*, 2011). Desta forma pode-se afirmar que esta pesquisa reduz a subjetividade da avaliação do risco operacional.

A construção da matriz de risco apoiada em técnicas de ponderação reduziu a subjetividade existente no processo de avaliação do risco, permitindo assim, a geração de objetivos para aplicação nas funções objetivas. O uso da opinião de especialistas, aplicação de questionários e escala linguística proporcionou esta redução na subjetividade (PEDRYCZ *et al.*, 2011).

Considera-se importante trabalhar na mesma base para realizar a comparação entre as subestações de energia elétrica. A definição desta escala para avaliação do risco permitiu caracterizar de forma probabilística os critérios e subcritérios. Para situações onde a condição é inaceitável adota-se valores máximos na avaliação de risco, condições intermediárias valores medianos e mínimos para condições extremamente adequadas, seja do ponto de vista tecnológico, condicional ou procedimental.

Nesta pesquisa considerou-se que um equipamento ou processo que esteja no estado da técnica, de forma geral, possui uma menor probabilidade de apresentar problemas. As condições intermediárias são definidas nesta escala e consideram situações minimamente aceitáveis.

Além disso, o método ARRS propõe uma avaliação atemporal visto que durante as atualizações da avaliação de risco considera o estado da técnica sempre como o ponto de partida como valor mínimo de avaliação e de obsolescência para os valores de maior grau de risco.

A combinação dos conceitos de risco e métodos e modelos de tomada de decisão foi de fundamental importância para atingir o objetivo desta pesquisa. O método *AHP* proporcionou adequadamente os valores dos pesos definidos por especialistas. A subjetividade existente no processo de avaliação de risco foi minimizada por meio da aplicação de questionários que adotaram variáveis linguísticas. Tal medida facilita e direciona corretamente o trabalho do grupo de especialistas envolvido na avaliação de risco. Já a adaptação da abordagem proposta por Bellman-Zahed utilizada no aplicativo *AIDMS* gera alocação de recursos harmoniosas.

Por fim, verifica-se que a metodologia proposta apresenta harmonia entre os conceitos de tomada de decisão e avaliação de risco.

Capítulo 7

Resultados

Neste capítulo apresenta-se os resultados obtidos na pesquisa de Doutorado. Demonstra-se uma simulação do método ARRS na avaliação de risco operacional de um conjunto de três de subestações de energia elétrica.

7.1 Exemplo de aplicação: subestações de energia elétrica

Subestação é um conjunto de equipamentos interligados e organizados de forma a atender as necessidades técnicas de um determinado sistema elétrico. Esses equipamentos são destinados a realização de manobras e/ou transformação, compensação de reativos, estabelecimento de rotas alternativas de energia elétrica, medição, possuindo ainda dispositivos de proteção, cujo o objetivo é detectar faltas e proteger o sistema elétrico. Para-raios, disjuntores, seccionadoras, barramentos, transformadores, sala de controle, banco de capacitores, estruturas de concreto e metálica, cercas, portões, cubículos, sistema de aterramento são parte componentes de uma subestação de energia elétrica (MCDONALD, 2012).

Aplica-se como exemplo o Estudo de Caso contemplando a avaliação de risco operacional de três subestações de energia elétrica para modelagem matemática. O objetivo amplo desta análise é apresentar uma visão sistêmica das condições operacionais das subestações de energia elétrica e estabelecer qual instalação necessita ser mantida prioritariamente de forma a reduzir o risco operacional global.

De posse dos resultados da aplicação do método ARRS espera-se utilizar essas informações para o direcionamento mais racional dos recursos financeiros na prevenção de acidentes e mitigação de perdas produtivas em aplicações futuras. As subestações de energia elétrica selecionadas para a realização deste Estudo de Caso são caracterizadas conforme a Tabela 9.

Para determinar o grau de risco operacional das três subestações de energia elétrica cumprem-se as etapas propostas pelo método ARRS definidas na seção 6.1.

Tabela 9 – Especificação técnica das subestações de energia elétrica

Subestação	<i>kV</i>	<i>MVA</i>
PS1	34,5	15
PS2	138	43
PS3	69	43

7.1.1 Contextualização da avaliação de risco

O objetivo da avaliação de risco é definir em qual subestação deve-se investir de forma prioritária recursos para redução do risco operacional. A análise consiste em utilizar múltiplos critérios que possam representar os fatores mais significativos causadores de acidentes e/ou perdas produtivas. Para este estudo considera-se risco operacional a combinação de aspectos de segurança de pessoas e requisitos técnicos.

7.1.2 Seleção das subestações

A presente pesquisa selecionou três subestações para desenvolver e testar o modelo teórico. As subestações possuem tecnologia, idade e condições gerais diferenciadas, o que torna a análise mais complexa. O método proposto foi concebido para se adaptar a este tipo de condição e reduzir as incertezas também proporcionadas pelas características específicas de cada subestação.

7.1.3 Definição dos especialistas

O grupo selecionado para participação desta avaliação do risco operacional é composto por cinco profissionais com ampla experiência na gestão, operação e manutenção em subestações de energia elétrica.

7.1.4 Definição dos critérios e subcritérios

Por meio de reuniões técnicas o grupo de especialistas estabeleceu os critérios e subcritérios aplicáveis no contexto da avaliação de risco. Essa lista foi construída de acordo com estratégia da empresa, experiência dos especialistas e apoiada na literatura correlata sobre avaliação de risco e subestações (CAWLEY, 2003; GILL, 2008; SOUSA, 2010; INTERNATIONAL, 2012; NFPA, 2015; MCDONALD, 2016; ISO, 2018, 2019). Nota-se que a literatura correlata é limitada no que diz respeito a avaliação de risco em subestações. Neste sentido tornou-se necessário apoiar-se também na opinião de especialistas. Além

disso, os especialistas definiram doze grupos de equipamentos ou componentes *s* para a estruturação da avaliação:

1. Sistema de proteção de descarga atmosférica: conjunto de equipamentos destinados a captação, direcionamento e escoamento de descargas atmosféricas, contribuindo com o controle da tensão de passo e toque;
2. Sistema de seccionamento: equipamentos destinados a seccionar circuitos em alta tensão (chaves seccionadoras);
3. Sistema de manobra: Disjuntores de pátio;
4. Sistemas de energia auxiliares: Banco de baterias destinados ao sistema de proteção em situações de ausência de energia elétrica na subestação;
5. Cabeamento e barramentos: cabos e barramentos responsáveis pela interligação dos diversos componentes da subestação;
6. Sistema de proteção, medição e controle: transformadores de corrente e potencial, relés de proteção, medição e controle;
7. Transformadores e sistemas associados: transformadores de potência;
8. Painéis: painéis de baixa e alta tensão;
9. Sistemas de reativos: banco de capacitores e reatores;
10. Sistema de aterramento: aterramento de equipamentos e estruturas;
11. Sistema de proteção contra incêndio: proteção ativa e passiva;
12. Infra civil e aspectos gerais: estruturas, acessos, cercas, muros, canaletas, pátio, entre outros.

A definição do grupo de componentes tem por objetivo realizar uma avaliação mais detalhada dos sistemas das subestações de energia elétrica. A definição dos grupos reflete a necessidade de analisar sistematicamente as condições gerais e proporcionar uma visão gerencial das condições das subestações.

7.1.5 Classificação dos critérios e subcritérios

Os especialistas realizaram a classificação dos critérios e subcritérios em dois grupos: consequência ou probabilidade. Os critérios, subcritérios e escala de avaliação definidos pelos especialistas são representados pelas Tabelas 10 - 14. Os critérios relacionados à consequências representam o grau de impacto mediante a manifestação da falha ou acidente

na subestação. Os critérios relacionados à probabilidade estão relacionados as condições encontradas durante o processo de diagnóstico descrito nas etapas seguintes.

Tabela 10 – Critérios para consequência

ID	Critério	Definição	Escala	Conceito
J1	Impacto ambiental	Avaliação do impacto ambiental mediante a interrupção de energia elétrica	Baixo	Falha no fornecimento de energia elétrica não compromete o funcionamento de sistemas e equipamentos de controle e monitoramento ambiental.
			Médio	Falha no fornecimento de energia elétrica compromete o funcionamento de sistemas e equipamentos de controle e monitoramento ambiental não críticos.
			Alto	Falha no fornecimento de energia elétrica compromete o funcionamento de sistemas e equipamentos de controle e monitoramento ambiental críticos.
J2	Impacto reputacional	Avaliação do impacto reputacional mediante a interrupção de energia elétrica	Baixo	Falha no fornecimento de energia elétrica não compromete a imagem da empresa.
			Médio	Falha no fornecimento de energia elétrica compromete a imagem da empresa (Impacto local).
			Alto	Falha no fornecimento de energia elétrica compromete significativamente a imagem da empresa (Impacto regional ou nacional).
J3	Impacto produtivo	Avaliação do impacto operacional mediante falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia analisada	Baixo	Falha no fornecimento de energia elétrica não compromete o caminho crítico do processo produtivo.
			Médio	Falha no fornecimento de energia elétrica compromete o caminho crítico do processo produtivo.
			Alto	Falha no fornecimento de energia elétrica compromete o processo produtivo geral de uma ou mais unidades operacionais.
J4	Impacto financeiro	Valor estimado para a construção de uma subestação de energia nova.	Baixo	$x \leq R\$ 1.000.000,00$
			Médio	$R\$ 1.000.000,00 < x < R\$ 20.000.000,00$
			Alto	$x \leq R\$ 20.000.000,00$

7.1.6 Estruturação da hierarquia dos critérios e sub-critérios

Realiza-se a estruturação da hierarquia dos critérios e sub-critérios de forma a estabelecer a composição matemática dos valores da consequência e probabilidade. A estruturação proposta pelos especialistas é representada pela Figura 11. Define-se para o grupo consequência quatro critérios e para o grupo probabilidade quatro critérios, que são interligados aos seus subcritérios, cada qual possuindo cinco, três, três e quatro subcritérios, respectivamente.

7.1.7 Ponderação dos critérios e subcritérios - AHP

Os valores da ponderação de cada critério e subcritério foram obtidos por meio da aplicação do método AHP conforme descrito na seção 4.2.1.

As Tabelas 15, 18, 21, 24, 27, 30 representam as matrizes comparativas de cada grupo de critérios e subcritérios analisados pelos especialistas. Esta etapa considera quais critérios e subcritérios são mais relevantes sob o ponto de vista do risco operacional. O resultado da ponderação de cada grupo de critério é representado pelas Tabelas 16, 19, 22, 25, 28 e 31. Os valores da ponderação relacionados à consequência são indicados na coluna ω_j . Para os critérios de probabilidade adota-se ω_k e para os subcritérios utiliza-se ω_f^1 , ω_f^2 , ω_f^3 e ω_f^4 , respectivamente.

Tabela 11 – Critérios para probabilidade - D1

ID	Critério	ID	Subcritério	Definição	Escala	Conceito
D1	Equipamento	F1	Redundância	Análise da existência de equipamentos redundantes que possam ser utilizados mediante a ocorrência de falhas.	Redundante ativo	Existência de um equipamento à disposição imediata.
					Redundante inativo	Existência de um equipamento à disposição sem possibilidade de operação imediata.
					Não possui	Não possui equipamento redundante.
		F2	Tecnologia	Verificação se a tecnologia utilizada apresenta defasagem do ponto de vista de segurança e operacional.	Estado da técnica	Equipamento mais moderno aplicado.
					Atual	Equipamento que atende os requisitos básicos de segurança.
					Ultrapassada/ Inexistente	Equipamento obsoleto ou ausente.
		F3	Assistência técnica	Estabelece a característica da mão-de-obra necessária para a realização da manutenção do equipamento de forma adequada mediante falhas.	Regional	Profissional disponível para atuação residindo na região.
					Nacional	Profissional disponível em outro estado.
					Não possui	Não possui mão-de-obra qualificada para realizar a manutenção.
					Existente	Equipamento disponível em estoque ou via empréstimo
Equipamento indisponível e depende de aquisição via suprimentos						
F4	Disponibilidade equipamento reserva	Análise da existência e complexidade em substituir um determinado equipamento mediante falhas.	Depende de aquisição	Equipamento não pode ser substituído.		
			Não possui	Equipamento disponível em estoque ou via empréstimo		
F5	Reposição de peças ou insumo	Análise da complexidade em realizar a reposição de peças mediante a necessidade de manutenção.	Imediata	Peça disponível em estoque ou via empréstimo		
			Aquisição	Peça indisponível e depende de aquisição via suprimentos		
			Não possui	Peça descontinuada.		

Tabela 12 – Critérios para probabilidade - D2

ID	Critério	ID	Subcritério	Definição	Escala	Conceito
D2	Procedimento	F6	Procedimento de manutenção	Estabelece a existência do procedimento de manutenção e o nível de detalhamento proporcionado pelo seu conteúdo.	Específico	Procedimento elaborado especificamente para as atividades no equipamento e equipe treinada.
					Integrado a um genérico	Procedimento genérico para realizar atividades no equipamento e equipe treinada.
					Não possui	Não possui procedimento de intervenção.
		F7	Procedimento de operação	Estabelece a existência do procedimento de operação e o nível de detalhamento proporcionado pelo seu conteúdo.	Específico	Procedimento elaborado especificamente para as atividades no equipamento e equipe treinada.
					Integrado a um genérico	Procedimento genérico para realizar atividades no equipamento e equipe treinada.
					Não possui	Não possui procedimento de intervenção.
F8	Tipo de operação	Define tipo e grau de exposição do profissional durante a intervenção no equipamento.	Remota ou N/A	Operação do equipamento realizado à distância ou não se aplica o conceito.		
			Parcialmente remota/ EPIs	Operação do equipamento remota em algumas circunstâncias.		
			Local/ Uso de EPIs	Operação local com a necessidade de uso de EPIs		

Tabela 13 – Critérios para probabilidade - D3

ID	Critério	ID	Subcritério	Definição	Escala	Conceito
D3	Mão-de-obra	F9	Mão de obra	Verificação da disponibilidade de mão-de-obra necessária mediante falhas complexas do equipamento.	MO básica	Eventos normalmente necessitam de mão-de-obra básica para atuação.
					MO especializada	Eventos normalmente necessitam de mão-de-obra especializada para atuação.
					Não possui	Não possui mão-de-obra qualificada para realizar a manutenção.
		F10	Exposição média diária durante a manutenção do equipamento	Define o tempo médio que é necessário para realizar reparos cotidianos.	x<2	Intervenções com tempo médio de no máximo 2 horas.
					2<x<4	Intervenções com tempo médio entre 2 a 4 horas.
					<8	Intervenções com tempo médio superior a 4 horas.
		F11	Periodicidade de intervenção	Define o período de tempo médio necessário para operação e realizar reparos cotidianos.	Anual Mensal Semestral Semanal Diária	Atuação no equipamento anual. Atuação no equipamento mensal. Atuação no equipamento semestral. Atuação no equipamento semanal. Atuação no equipamento diário.

Tabela 14 – Critérios para probabilidade - D4

ID	Critério	ID	Subcritério	Definição	Escala	Conceito
D4	Manutenção	F12	Historio de incidentes ou falhas operacionais	Define o tempo médio de ocorrência de incidentes ou falhas operacionais no equipamento.	>anual	Ocorrência de incidente ou falha com tempo superior a 1 ano.
					Semestral	Ocorrência de incidente ou falha com tempo superior a um mês e inferior a um ano.
					Mensal	Ocorrência de incidente ou falha com tempo inferior a um mês.
		F13	Tipo de Manutenção	Classificação do tipo de manutenção adotado no equipamento.	Estado da técnica Preventiva e Preditiva Corretiva	Modelo de manutenção baseado em técnicas reconhecidas como as mais moderas e eficazes. Adoção de técnicas de Preventiva e preditiva Atuação mediante a quebra ou paralisação do equipamento.
		F14	Condição crítica operacional identificada	Identificação de condições que podem comprometer acidentes pessoais, perdas produtivas ou interrupção do fornecimento de energia elétrica.	Não crítica Uma condição crítica Múltiplas condições críticas identificadas	Condições críticas não identificadas no grupo sob estudo. Uma condição crítica identificada no grupo sob estudo. Duas ou mais condições críticas identificadas no grupo sob estudo.
		F15	Adequação e aderência ao plano de manutenção (Back log)	Análise da existência, consistência e execução do plano de manutenção proposto ao equipamento.	Aderente Parcialmente aderente Não aderente	Plano de ação elaborado com validação da engenharia, cadastrado em sistema informatizado e com inspeções aderentes. Plano de ação elaborado com validação da engenharia, cadastrado em sistema informatizado e com inspeções não aderentes. Não possui plano de manutenção ou plano validado pela engenharia.

As Tabelas 17 - 32 apresentam a verificação da qualidade da comparação realizada evidenciada pelo valor do Índice de Consistência $CI \leq 0,1$ conforme seção 4.2.1.

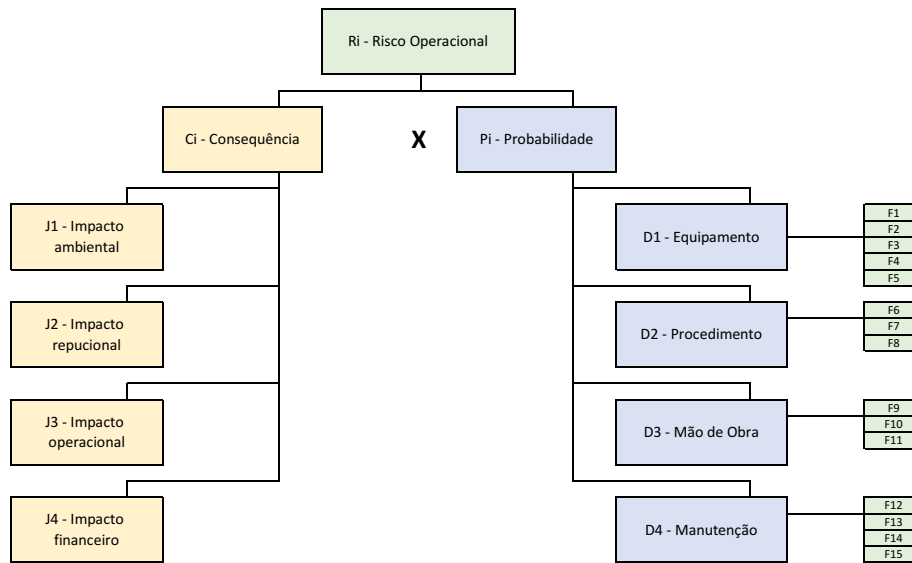


Figura 11 – Avaliação de risco.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Matriz de comparação de pares 1

Critério	J1	J2	J3	J4
J1 - Impacto ambiental	1,00	1,00	0,33	0,33
J2 - Impacto reputacional	1,00	1,00	0,33	0,33
J3 - Impacto operacional	3,00	3,00	1,00	1,00
J4 - Impacto financeiro	3,00	3,00	1,00	1,00
Soma	8,00	8,00	2,67	2,67

Tabela 16 – Eigenvector e Eigenvalue 1

Critério	J1	J2	J3	J4	Soma	ω_j	Vetor	λ_{Max}
J1 - Impacto ambiental	0,13	0,13	0,13	0,13	0,50	0,13	4,00	4,00
J2 - Impacto reputacional	0,13	0,13	0,13	0,13	0,50	0,13	4,00	
J3 - Impacto operacional	0,38	0,38	0,38	0,38	1,50	0,38	4,00	
J4 - Impacto financeiro	0,38	0,38	0,38	0,38	1,50	0,38	4,00	
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00		

Tabela 17 – Avaliação da consistência 1

n	4
C_i	0,00
R_i	0,90
$CRatio$	0,00

Tabela 18 – Matriz de comparação de pares 2

Critério	D1	D2	D3	D4
D1 - Equipamento	1,00	3,00	3,00	0,20
D2 - Procedimento	0,33	1,00	3,00	0,14
D3 - Mão-de-obra	0,33	0,33	1,00	0,14
D4 - Manutenção	5,00	7,00	7,00	1,00
Soma	6,67	11,33	14,00	1,49

Tabela 19 – Eigenvector e Eigenvalue 2

Critério	D1	D2	D3	D4	Soma	ω_k	Vetor	λ_{Max}
D1 - Equipamento	0,15	0,26	0,21	0,13	0,76	0,19	4,40	4,24
D2 - Procedimento	0,05	0,09	0,21	0,10	0,45	0,11	4,03	
D3 - Mão-de-obra	0,05	0,03	0,07	0,10	0,25	0,06	4,11	
D4 - Manutenção	0,75	0,62	0,50	0,67	2,54	0,64	4,42	
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00		

Tabela 20 – Avaliação da consistência 2

n	4
C_i	0,08
R_i	0,90
C Ratio	0,09

Tabela 21 – Matriz de comparação de pares 3

Sub-critério	F1	F2	F3	F4	F5
F1 - Redundância	1,00	7,00	7,00	7,00	9,00
F2 - Tecnologia	0,14	1,00	5,00	5,00	5,00
F3 - Assistência técnica	0,14	0,20	1,00	1,00	1,00
F4 - Disponibilidade de equipamento	0,14	0,20	1,00	1,00	1,00
F5 - Peça de reposição	0,11	0,20	1,00	1,00	1,00
Soma	1,54	8,60	15,00	15,00	17,00

Tabela 22 – Eigenvector e Eigenvalue 3

Sub-critério	F5	F6	F7	F8	F9	Soma	ω_f^1	Vetor	λ_{Max}
F1	0,65	0,81	0,47	0,47	0,53	2,93	0,59	6,16	5,31
F2	0,09	0,12	0,33	0,33	0,29	1,17	0,23	5,22	
F3	0,09	0,02	0,07	0,07	0,06	0,31	0,06	5,05	
F4	0,09	0,02	0,07	0,07	0,06	0,31	0,06	5,05	
F5	0,07	0,02	0,07	0,07	0,06	0,29	0,06	5,09	
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00		

Tabela 23 – Avaliação da consistência 3

n	5
C_i	0,08
R_i	1,12
C Ratio	0,07

Tabela 24 – Matriz de comparação de pares 4

Sub-critério	F6	F7	F8
F6 - Procedimento de manutenção	1,00	1,00	0,14
F7 - Procedimento de operação	1,00	1,00	0,14
F8 - Tipo de operação	7,00	7,00	1,00
Soma	9,00	9,00	1,29

Tabela 25 – *Eigenvector e Eigenvalue 4*

Sub-critério	C10	C11	C12	Soma	ω_f^2	Vetor	λ_{Max}
F6 - Procedimento de manutenção	0,11	0,11	0,11	0,33	0,11	3,00	3,00
F7 - Procedimento de operação	0,11	0,11	0,11	0,33	0,11	3,00	
F8 - Tipo de operação	0,78	0,78	0,78	2,33	0,78	3,00	
Soma	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00		

Tabela 26 – Avaliação da consistência 4

n	3
C_i	0,00
R_i	0,58
$CRatio$	0,00

Tabela 27 – Matriz de comparação de pares 5

Sub-critério	F9	F10	F11
F9 - Mão-de-obra	1,00	7,00	9,00
F10 - Exposição média diária	0,14	1,00	3,00
F11 - Frequência de intervenção	0,11	0,33	1,00
Soma	1,25	8,33	13,00

Tabela 28 – *Eigenvector e Eigenvalue 5*

Sub-critério	F9	F10	F11	Soma	ω_f^3	Vetor	λ_{Max}
F9 - Mão-de-obra	0,80	0,84	0,69	2,33	0,78	3,19	3,08
F10 - Exposição média diária	0,11	0,12	0,23	0,46	0,15	3,04	
F11 - Frequência de intervenção	0,09	0,04	0,08	0,21	0,07	3,01	
Soma	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00		

Tabela 29 – Avaliação da consistência 5

n	3
C_i	0,04
R_i	0,58
$CRatio$	0,07

Tabela 30 – Matriz de comparação de pares 6

Sub-critério	F12	F13	F14	F15
F12 - Histórico operacional de falhas ou acidentes	1,00	3,00	0,11	0,33
F13 - Tipo de manutenção	0,33	1,00	0,11	0,20
F14 - Condições operacionais críticas	9,00	9,00	1,00	7,00
F15 - Plano de manutenção	3,00	5,00	0,14	1,00
Soma	13,33	18,00	1,37	8,53

Tabela 31 – *Eigenvector e Eigenvalue* 6

Sub-critério	F12	F13	F14	F15	Soma	ω_f^4	Vetor	λ_{Max}
F12	0,08	0,17	0,08	0,04	0,36	0,09	4,04	4,27
F13	0,03	0,06	0,08	0,02	0,19	0,05	4,07	
F14	0,68	0,50	0,73	0,82	2,73	0,68	4,67	
F15	0,23	0,28	0,10	0,12	0,72	0,18	4,32	
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00		

Tabela 32 – Avaliação da consistência 6

n	4
C_i	0,09
R_i	0,90
$CRatio$	0,10

7.1.8 Elaboração de questionário

Para cada critério ou subcritério criou-se perguntas chaves e um grupo de respostas para serem selecionadas pelos avaliadores. As perguntas são definidas conforme conceitos técnicos e de acordo com experiência de cada especialista. A estrutura das perguntas está conforme o esquema proposto pela Figura 11.

Para cada resposta definiu-se os valores entre 0,1 e 1 de acordo com a escala de criticidade. As respostas foram elaboradas conforme o nível desejado de conformidade. Sendo que situações mais satisfatórias adotam valores mais baixos, números intermediários para condições minimamente aceitáveis e números igual a 1 para condições críticas ou indesejadas.

A quantidade de opções de respostas disponíveis varia entre 3 e 5 por critério ou subcritério. Para condições de atendimento pleno considera-se, por exemplo, utilização de técnicas ou equipamentos que estão no estado da técnica, ou seja, aqueles que são considerados a melhor opção existente na atualidade. Para perguntas com três ou cinco opções de resposta, uma escala linguística é aplicada (0,1, 0,5 ou 1,0) ou (0,1, 0,2, 0,4, 0,6 ou 1,0), respectivamente. As Tabelas 33 - 37 apresentam as ponderações definidas para a realização da avaliação de risco operacional.

Tabela 33 – Escala linguística - J_n - consequência.

Consequência J_n							
Impacto ambiental	Valor	Impacto reputacional	Valor	Impacto produtivo	Valor	Impacto financeiro	Valor
Baixo	0,1	Baixo	0,1	Baixo	0,1	Baixo	0,1
Médio	0,5	Médio	0,5	Médio	0,5	Médio	0,5
Alto	1	Alto	1	Alto	1	Alto	1

Tabela 34 – Escala linguística - D1 - probabilidade.

Probabilidade D1 - Equipamento								
Redundância	Valor	Tecnologia	Valor	Assistência técnica	Valor	Disponibilidade equipamento reserva	Valor	Reposição de peças ou insumo
Redundante ativo ou N/A	0,1	Estado da técnica	0,1	Regional	0,1	Existente ou N/A	0,1	Imediata
Redundante inativo	0,5	Atual	0,5	Nacional	0,5	Depende de aquisição	0,5	Aquisição
Não possui	1	Ultrapassada/ Inexistente	1	Não possui	1	Não possui	1	Não possui

Tabela 35 – Escala linguística - D2 - probabilidade.

Probabilidade D2 - Procedimento					
Procedimento de manutenção	Valor	Procedimento de operação	Valor	Tipo de operação	Valor
Específico	0,1	Específico	0,1	Remota ou N/A	0,1
Integrado a um genérico	0,5	Integrado a um genérico	0,5	Parcialmente remota/ EPIs	0,5
Não possui	1	Não possui	1	Local/ Uso de EPIs	1

Tabela 36 – Escala linguística - D3 - probabilidade.

Probabilidade D3 - Mão de Obra					
Mão de obra	Valor	Exposição média diária durante a manutenção do equipamento	Valor	Periodicidade de intervenção	Valor
MO básica	0,1	$x < 2$	0,1	Anual	0,1
MO especializada	0,5	$2 < x < 4$	0,5	Mensal	0,2
Não possui	1	< 8	1	Semestral	0,4
				Semanal	0,6
				Diária	1

Tabela 37 – Escala linguística - D4 - probabilidade.

Probabilidade D4 - Manutenção							
Histórico de incidentes ou falhas operacionais	Valor	Tipo de Manutenção	Valor	Condição crítica operacional identificada	Valor	Adequação e aderência ao plano de manutenção (Back log)	Valor
>anual	0,1	Estado da técnica	0,1	Não possui	0,1	Aderente	0,1
Semestral	0,5	Preventiva e Preditiva	0,5	Uma condição	0,5	Parcialmente aderente	0,5
Mensal	1	Corretiva	1	Múltiplas condições	1	Não aderente	1

7.1.9 Realização da avaliação de risco

A partir desta estrutura matemática e questionário realizou-se a simulação da avaliação de três subestações de energia elétrica. Os dados coletados baseiam-se em informações disponíveis e na análise de campo realizada em conjunto com os respectivos responsáveis técnicos das subestações de energia elétrica.

Os questionários respondidos das subestações de energia PS1, PS2 e PS3 contendo a avaliação dos critérios e subcritérios podem ser visualizados nos apêndices **E**, **F** e **G**, respectivamente.

7.1.10 Integração dos resultados

Os dados do questionário são cadastrados em um sistema informatizado para realização dos cálculos matemáticos conforme proposto na seção 6.1. Aplicando a Passo (9), os valores de P_i , C_i e R_i de cada subestação de energia são obtidos, utilizando as Equações (6.7)-(6.13) e (3.1), respectivamente. Os valores da avaliação individual de cada critério e sub-critério, pesos e resultados dos cálculos podem ser visualizados nas Tabelas 38 a 55.

Tabela 38 – Tabela numérica consequência PS1.

PS1 - Consequência								
akj	J1	0,125	J2	0,125	J3	0,375	J4	0,375
Gj	Médio	0,5	Baixo	0,1	Alto	1	Médio	0,5
Ji	0,06		0,01		0,38		0,19	
Ci	0,64							

Tabela 39 – Tabela numérica probabilidade PS1 - P1.

Grupo de equipamentos	Probabilidade 1									1,00	
	akj	F1	0,59	F2	0,23	F3	0,06	F4	0,06	F5	0,06
Sistema de proteção de descarga atmosférica	B _f	Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10
Sistema de seccionamento		Não possui	1,00	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50
Sistema de manobra		Não possui	1,00	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Não possui	1,00
Sistemas de energia auxiliares		Redundante inativo	0,50	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Aquisição	0,50
Cabeamento e Barramentos		Redundante inativo	0,50	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50
Sistema de proteção, medição e controle	A _h	Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50
Transformadores e sistemas associados		Redundante inativo	0,50	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Aquisição	0,50
Painéis		Não possui	1,00	Atual	0,50	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50
Sistemas de reativos (BC e reatores)		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Aquisição	0,50
Sistema de aterramento		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10
Sistema de proteção contra incêndio		Redundante ativo ou N/A	0,10	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Não possui	1,00	Existente ou N/A	0,10	Aquisição	0,50
Infra-civil e aspectos gerais		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10
Sub-Total	F _f	0,25		0,16		0,01		0,02		0,03	
Total	K _k	0,46									

Tabela 40 – Tabela numérica probabilidade PS1 - P2.

Grupo de equipamentos	Probabilidade 2					1,00	
	akj	F6	0,78	F7	0,15	F8	0,07
Sistema de proteção de descarga atmosférica	B _f	Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Sistema de seccionamento		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Local/ Uso de EPIs	1,00
Sistema de manobra		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Local/ Uso de EPIs	1,00
Sistemas de energia auxiliares		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Local/ Uso de EPIs	1,00
Cabeamento e Barramentos		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Sistema de proteção, medição e controle	A _h	Não possui	1,00	Não possui	1,00	Parcialmente remota/ EPIs	0,50
Transformadores e sistemas associados		Integrado a um genérico	0,50	Não possui	1,00	Parcialmente remota/ EPIs	0,50
Painéis		Integrado a um genérico	0,50	Não possui	1,00	Parcialmente remota/ EPIs	0,50
Sistemas de reativos (BC e reatores)		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Parcialmente remota/ EPIs	0,50
Sistema de aterramento		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Sistema de proteção contra incêndio		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Infra-civil e aspectos gerais		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Sub-Total	F _f	0,71		0,15		0,03	
Total	K _k	0,90					

Tabela 41 – Tabela numérica probabilidade PS1 - P3.

Grupo de equipamentos	Probabilidade 3					1,00	
	akj	F9	0,78	F10	0,15	F11	0,07
Sistema de proteção de descarga atmosférica	B _f	MO básica	0,10	x<2	0,10	Anual	0,10
Sistema de seccionamento		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Semestral	0,40
Sistema de manobra		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Semanal	0,60
Sistemas de energia auxiliares		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Mensal	0,20
Cabeamento e Barramentos		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Anual	0,10
Sistema de proteção, medição e controle	A _h	MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Diária	1,00
Transformadores e sistemas associados		MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Mensal	0,20
Painéis		MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Diária	1,00
Sistemas de reativos (BC e reatores)		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Semestral	0,40
Sistema de aterramento		MO básica	0,10	x<2	0,10	Anual	0,10
Sistema de proteção contra incêndio		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Anual	0,10
Infra-civil e aspectos gerais		MO básica	0,10	x<2	0,10	Anual	0,10
Sub-Total	F _f	0,31		0,03		0,02	
Total	K _k	0,37					

Tabela 42 – Tabela numérica probabilidade PS1 - P4.

Grupo de equipamentos	akj	Probabilidade 4						0,95	
		F12	0,09	F13	0,05	F14	0,68	F15	0,18
B _f		2,90		8,50		2,40		9,00	
Sistema de proteção de descarga atmosférica	A _h	>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00
Sistema de seccionamento		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50
Sistema de manobra		Semestral	0,50	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00
Sistemas de energia auxiliares		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50
Cabeamento e Barramentos		>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00
Sistema de proteção, medição e controle		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50
Transformadores e sistemas associados		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50
Painéis		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50
Sistemas de reativos (BC e reatores)		Mensal	1,00	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,50	Parcialmente aderente	0,50
Sistema de aterramento		Semestral	0,50	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00
Sistema de proteção contra incêndio		>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,50	Não aderente	1,00
Infra-civil e aspectos gerais		>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,50	Não aderente	1,00
Sub-Total		F _f	0,02		0,03		0,14		0,14
Total		K _k				0,33			

Tabela 43 – Tabela numérica consequência PS2.

PS2 - Consequência								
akj	J1	0,125	J2	0,125	J3	0,375	J4	0,375
G _j	Médio	0,5	Baixo	0,1	Alto	1	Alto	1
J _i	0,06		0,01		0,38		0,38	
C _i				0,83				

Tabela 44 – Tabela numérica probabilidade PS2 - P1.

Grupo de equipamentos	akj	Probabilidade 1						1,00			
		F1	0,59	F2	0,23	F3	0,06	F4	0,06	F5	0,06
B _f		6,00		7,10		2,50		3,20		4,50	
Sistema de proteção de descarga atmosférica	A _h	Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10
Sistema de seccionamento		Não possui	1,00	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Aquisição	0,50
Sistema de manobra		Redundante ativo ou N/A	0,10	Estado da técnica	0,10	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Não possui	1,00
Sistemas de energia auxiliares		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50
Cabeamento e Barramentos		Redundante inativo	0,50	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10
Sistema de proteção, medição e controle		Não possui	1,00	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10
Transformadores e sistemas associados		Redundante inativo	0,50	Atual	0,50	Não possui	1,00	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50
Painéis		Não possui	1,00	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Nacional	0,50	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50
Sistemas de reativos (BC e reatores)		Redundante inativo	0,50	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50
Sistema de aterramento		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10
Sistema de proteção contra incêndio		Não possui	1,00	Atual	0,50	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50
Infra-civil e aspectos gerais		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10
Sub-Total		F _f	0,29		0,14		0,01		0,02		0,02
Total		K _k					0,48				

Tabela 45 – Tabela numérica probabilidade PS2 - P2.

Grupo de equipamentos	akj	Probabilidade 2				1,00	
		F6	0,78	F7	0,15	F8	0,07
B _f		10,20		11,10		3,90	
Sistema de proteção de descarga atmosférica	A _h	Específico	0,10	Específico	0,10	Remota ou N/A	0,10
Sistema de seccionamento		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Sistema de manobra		Específico	0,10	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Sistemas de energia auxiliares		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Local/ Uso de EPIs	1,00
Cabeamento e Barramentos		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Sistema de proteção, medição e controle		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Transformadores e sistemas associados		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Painéis		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Local/ Uso de EPIs	1,00
Sistemas de reativos (BC e reatores)		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Local/ Uso de EPIs	1,00
Sistema de aterramento		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Sistema de proteção contra incêndio		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Infra-civil e aspectos gerais		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10
Sub-Total		F _f	0,66		0,14		0,02
Total		K _k			0,83		

Tabela 46 – Tabela numérica probabilidade PS2 - P3.

Grupo de equipamentos	Probabilidade 3						1,00	
	<i>akj</i>	F9	0,78	F10	0,15	F11	0,07	
	<i>B_f</i>		4,80		2,80		3,00	
Sistema de proteção de descarga atmosférica	<i>A_h</i>	MO básica	0,10	x<2	0,10	Semestral	0,40	
Sistema de seccionamento		MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Semestral	0,40	
Sistema de manobra		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Anual	0,10	
Sistemas de energia auxiliares		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Mensal	0,20	
Cabeamento e Barramentos		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Anual	0,10	
Sistema de proteção, medição e controle		MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Mensal	0,20	
Transformadores e sistemas associados		MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Mensal	0,20	
Painéis		MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Semanal	0,60	
Sistemas de reativos (BC e reatores)		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Mensal	0,20	
Sistema de aterramento		MO básica	0,10	x<2	0,10	Semestral	0,40	
Sistema de proteção contra incêndio		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Anual	0,10	
Infra-civil e aspectos gerais		MO básica	0,10	x<2	0,10	Anual	0,10	
Sub-Total		<i>F_f</i>	0,31		0,04		0,02	
Total		<i>K_k</i>	0,36					

Tabela 47 – Tabela numérica probabilidade PS2 - P4.

Grupo de equipamentos	Probabilidade 4						0,95			
	<i>akj</i>	F12	0,09	F13	0,05	F14	0,68	F15	0,18	
	<i>B_f</i>		2,90		8,10		2,00		7,10	
Sistema de proteção de descarga atmosférica	<i>A_h</i>	>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,50	Parcialmente aderente	0,50	
Sistema de seccionamento		Semestral	0,50	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50	
Sistema de manobra		>anual	0,10	Estado da técnica	0,10	Quantidade de itens críticos	0,10	Aderente	0,10	
Sistemas de energia auxiliares		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,50	Parcialmente aderente	0,50	
Cabeamento e Barramentos		Semestral	0,50	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00	
Sistema de proteção, medição e controle		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50	
Transformadores e sistemas associados		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50	
Painéis		>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00	
Sistemas de reativos (BC e reatores)		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50	
Sistema de aterramento		>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50	
Sistema de proteção contra incêndio		Mensal	1,00	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50	
Infra-civil e aspectos gerais		>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00	
Sub-Total		<i>F_f</i>	0,02		0,03		0,11		0,11	
Total		<i>K_k</i>	0,27							

Tabela 48 – Tabela numérica consequência PS3.

PS3 - Consequência								
<i>aj</i>	J1	0,125	J2	0,125	J3	0,375	J4	0,375
<i>G_j</i>	Baixo	0,1	Baixo	0,1	Médio	0,5	Médio	0,5
<i>J_i</i>	0,01		0,01		0,19		0,19	
<i>C_i</i>	0,40							

Tabela 49 – Tabela numérica probabilidade PS3 - P1.

Grupo de equipamentos	Probabilidade 1								1,00			
	<i>akj</i>	F1	0,59	F2	0,23	F3	0,06	F4	0,06	F5	0,06	
	<i>B_f</i>		5,10		8,00		2,10		3,20		5,30	
Sistema de proteção de descarga atmosférica	<i>A_h</i>	Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10	
Sistema de seccionamento		Não possui	1,00	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50	
Sistema de manobra		Não possui	1,00	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Não possui	1,00	
Sistemas de energia auxiliares		Redundante inativo	0,50	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Aquisição	0,50	
Cabeamento e Barramentos		Redundante inativo	0,50	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50	
Sistema de proteção, medição e controle		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50	
Transformadores e sistemas associados		Redundante inativo	0,50	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Aquisição	0,50	
Painéis		Não possui	1,00	Atual	0,50	Regional	0,10	Depende de aquisição	0,50	Aquisição	0,50	
Sistemas de reativos (BC e reatores)		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Aquisição	0,50	
Sistema de aterramento		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10	
Sistema de proteção contra incêndio		Redundante ativo ou N/A	0,10	Ultrapassada/ Inexistente	1,00	Não possui	1,00	Existente ou N/A	0,10	Aquisição	0,50	
Infra-civil e aspectos gerais		Redundante ativo ou N/A	0,10	Atual	0,50	Regional	0,10	Existente ou N/A	0,10	Imediata	0,10	
Sub-Total		<i>F_f</i>	0,25		0,16		0,01		0,02		0,03	
Total		<i>K_k</i>	0,46									

Tabela 50 – Tabela numérica probabilidade PS3 - P2.

Grupo de equipamentos	Probabilidade 2						1,00	
	<i>a</i> <i>k</i> <i>j</i>	F6	0,78	F7	0,15	F8	0,07	
	<i>B_f</i>	11,00		12,00		5,50		
Sistema de proteção de descarga atmosférica	<i>A_h</i>	Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10	
Sistema de seccionamento		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Local/ Uso de EPIs	1,00	
Sistema de manobra		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Local/ Uso de EPIs	1,00	
Sistemas de energia auxiliares		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Local/ Uso de EPIs	1,00	
Cabeamento e Barramentos		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10	
Sistema de proteção, medição e controle		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Parcialmente remota/ EPIs	0,50	
Transformadores e sistemas associados		Integrado a um genérico	0,50	Não possui	1,00	Parcialmente remota/ EPIs	0,50	
Painéis		Integrado a um genérico	0,50	Não possui	1,00	Parcialmente remota/ EPIs	0,50	
Sistemas de reativos (BC e reatores)		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Parcialmente remota/ EPIs	0,50	
Sistema de aterramento		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10	
Sistema de proteção contra incêndio		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10	
Infra-civil e aspectos gerais		Não possui	1,00	Não possui	1,00	Remota ou N/A	0,10	
Sub-Total		<i>F_f</i>	0,71		0,15		0,03	
Total		<i>K_k</i>	0,90					

Tabela 51 – Tabela numérica probabilidade PS3 - P3.

Grupo de equipamentos	Probabilidade 3						1,00	
	<i>a</i> <i>k</i> <i>j</i>	F9	0,78	F10	0,15	F11	0,07	
	<i>B_f</i>	4,80		2,40		4,30		
Sistema de proteção de descarga atmosférica	<i>A_h</i>	MO básica	0,10	x<2	0,10	Anual	0,10	
Sistema de seccionamento		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Semestral	0,40	
Sistema de manobra		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Semanal	0,60	
Sistemas de energia auxiliares		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Mensal	0,20	
Cabeamento e Barramentos		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Anual	0,10	
Sistema de proteção, medição e controle		MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Diária	1,00	
Transformadores e sistemas associados		MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Mensal	0,20	
Painéis		MO especializada	0,50	2<x<4	0,50	Diária	1,00	
Sistemas de reativos (BC e reatores)		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Semestral	0,40	
Sistema de aterramento		MO básica	0,10	x<2	0,10	Anual	0,10	
Sistema de proteção contra incêndio		MO especializada	0,50	x<2	0,10	Anual	0,10	
Infra-civil e aspectos gerais		MO básica	0,10	x<2	0,10	Anual	0,10	
Sub-Total		<i>F_f</i>	0,31		0,03		0,02	
Total		<i>K_k</i>	0,37					

Tabela 52 – Tabela numérica probabilidade PS3 - P4.

Grupo de equipamentos	Probabilidade 4								0,95	
	<i>a</i> <i>k</i> <i>j</i>	F12	0,09	F13	0,05	F14	0,68	F15	0,18	
	<i>B_f</i>	2,90		8,50		4,60		9,00		
Sistema de proteção de descarga atmosférica	<i>A_h</i>	>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,50	Não aderente	1,00	
Sistema de seccionamento		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50	
Sistema de manobra		Semestral	0,50	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	1,00	Não aderente	1,00	
Sistemas de energia auxiliares		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,50	Parcialmente aderente	0,50	
Cabeamento e Barramentos		>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00	
Sistema de proteção, medição e controle		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,50	Parcialmente aderente	0,50	
Transformadores e sistemas associados		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,50	Parcialmente aderente	0,50	
Painéis		>anual	0,10	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	1,00	Parcialmente aderente	0,50	
Sistemas de reativos (BC e reatores)		Mensal	1,00	Preventiva e Preditiva	0,50	Quantidade de itens críticos	0,10	Parcialmente aderente	0,50	
Sistema de aterramento		Semestral	0,50	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00	
Sistema de proteção contra incêndio		>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00	
Infra-civil e aspectos gerais		>anual	0,10	Corretiva	1,00	Quantidade de itens críticos	0,10	Não aderente	1,00	
Sub-Total		<i>F_f</i>	0,02		0,03		0,26		0,14	
Total		<i>K_k</i>	0,45							

Tabela 53 – Tabela ponderação probabilidade PS1.

Critério	PS1 Probabilidade							
	D1 - Equipamento	0,19	D2 - Procedimento	0,11	D3 - Mão de obra	0,06	D4 - Manutenção	0,64
Sub-Total	Equipamento	0,46	Procedimento	0,90	Mão de obra	0,37	Manutenção	0,33
Sub-Total	0,09		0,10		0,02		0,21	
Total	0,418							

Tabela 54 – Tabela ponderação probabilidade PS2.

PS2 Probabilidade								
Critério	D1 - Equipamento	0,19	D2 - Procedimento	0,11	D3 - Mão de obra	0,06	D4 - Manutenção	0,64
	Equipamento	0,48	Procedimento	0,83	Mão de obra	0,36	Manutenção	0,27
Sub-Total	0,09		0,09		0,02		0,17	
Total								0,381

Tabela 55 – Tabela ponderação probabilidade PS3.

PS3 Probabilidade								
Critério	D1 - Equipamento	0,19	D2 - Procedimento	0,11	D3 - Mão de obra	0,06	D4 - Manutenção	0,64
	Equipamento	0,46	Procedimento	0,90	Mão de obra	0,37	Manutenção	0,45
Sub-Total	0,09		0,10		0,02		0,29	
Total								0,498

As Figuras 12 - 14 apresentam os valores do risco operacional de cada subestação de energia obtidos após a integração dos dados de forma hierárquica.

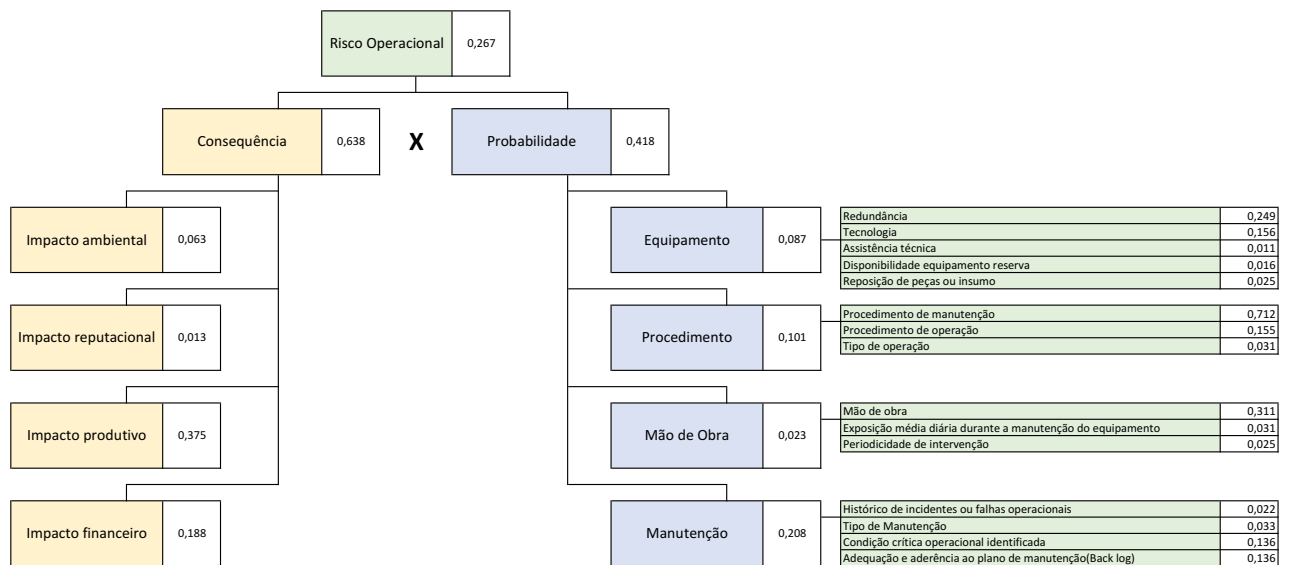


Figura 12 – Avaliação de risco PS01.

Fonte: Elaborado pelo autor.

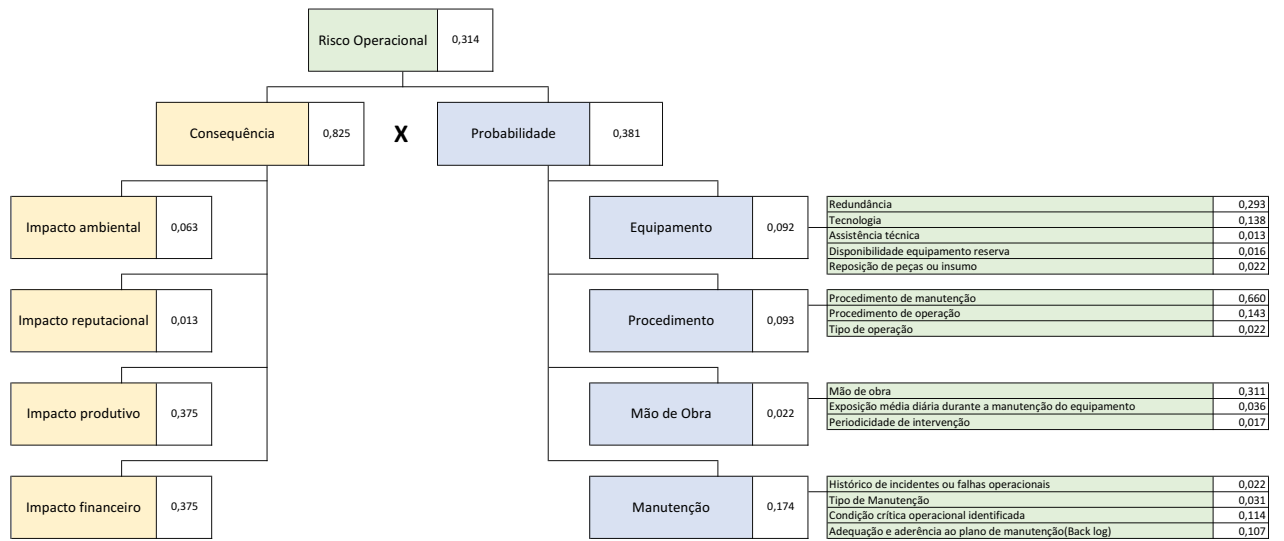


Figura 13 – Avaliação de risco PS02.

Fonte: Elaborado pelo autor.

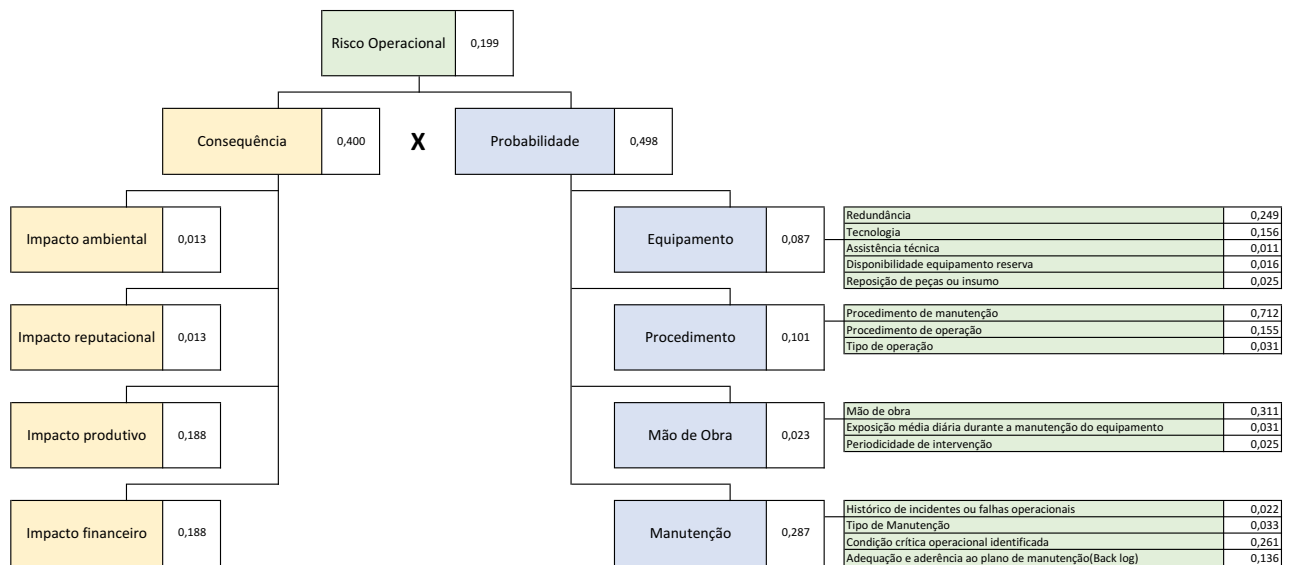


Figura 14 – Avaliação de risco PS03.

Fonte: Elaborado pelo autor.

7.1.11 Resultado da avaliação de risco

Os resultados correspondentes são apresentados na Tabela 56 e permitem a construção da matriz de risco representada na Figura 15.

Tabela 56 – Resultado da avaliação do risco operacional

Subestação	Probabilidade	Consequência	Nível de risco
PS1	0,418	0,638	0,267
PS2	0,381	0,825	0,314
PS3	0,498	0,400	0,199

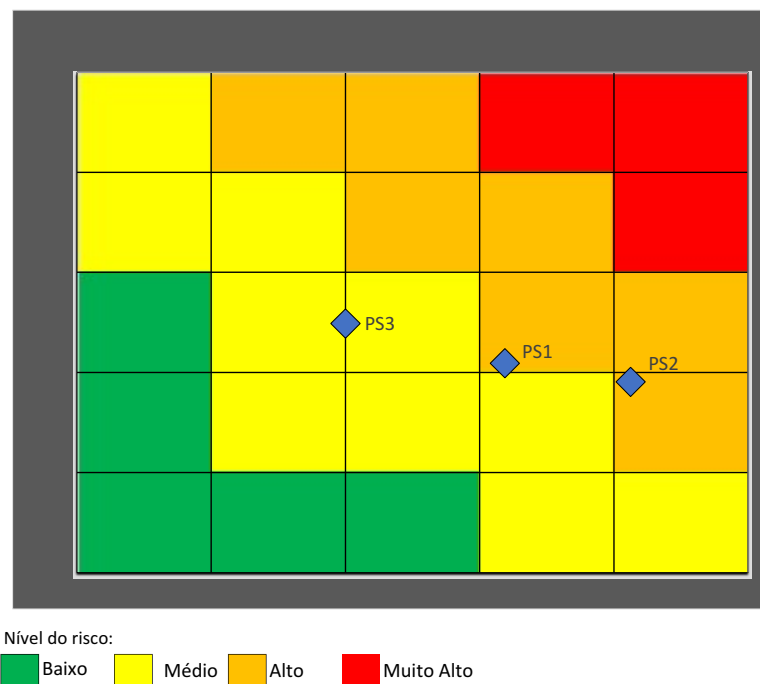


Figura 15 – Resultado da avaliação de risco das subestações..

Fonte: Elaborado pelo autor.

A execução da Passo (10) permite comparar, ordenar, e/ou priorizar as subestações de energia, levando em consideração os valores de C_i , P_i e R_i . É possível observar que as subestações de energia PS1 e PS2 estão localizadas na célula de alto risco e a subestação de energia PS3 na célula de médio risco.

7.1.12 Realização da alocação de recursos

O recurso total disponível RT para as três subestações de energia é R\$ 3.000.000,00. Assim, as seguintes restrições são levadas em consideração:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 3.000.000,00. \quad (26)$$

Além disso, as seguintes restrições, relacionadas à demanda das subestações, devem ser consideradas:

$$0 \leq x_1 \leq 465.000,00, \quad (27)$$

$$0 \leq x_2 \leq 1.866.000,00, \quad (28)$$

e

$$0 \leq x_3 \leq 1.116.000,00, \quad (29)$$

onde x_1 , x_2 e x_3 são as variáveis, que correspondem ao volume dos recursos buscados, e as demandas correspondentes (R\$ 465.000,00, R\$ 1.866.000,00 e R\$ 1.116.000,00) referem-se ao investimento necessário para solucionar o problema de risco operacional das três subestações de energia, respectivamente. A composição destes valores estão representados na Tabela 57. É importante ressaltar que o recurso disponível RT é inferior ao somatório D_t das demandas individuais D_n de cada subestação de energia, sendo necessário otimizá-lo. A Tabela 58 apresenta os valores necessários RT e disponíveis R_t para serem executados no ano orçamentário.

Tabela 57 – Demanda necessária por subestação em R\$

Grupo	Descrição	PS1 - D1	PS2 - D2	PS3 - D3
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	65.000,00	130.000,00	80.000,00
2	Sistema de seccionamento	35.000,00	550.000,00	45.000,00
3	Sistema de manobra	10.000,00	75.000,00	400.000,00
4	Sistemas de energia auxiliares	12.000,00	12.000,00	12.000,00
5	Cabeamento e Barramentos	16.000,00	16.000,00	22.000,00
6	Sistema de proteção, medição e controle	25.000,00	28.000,00	22.000,00
7	Transformadores e sistemas associados	55.000,00	400.000,00	150.000,00
8	Painéis	65.000,00	320.000,00	55.000,00
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	12.000,00	80.000,00	120.000,00
10	Sistema de aterramento	55.000,00	55.000,00	55.000,00
11	Sistema de proteção contra incêndio	80.000,00	80.000,00	80.000,00
12	Infra-civil e aspectos gerais	35.000,00	120.000,00	75.000,00
Total [R\$]		465.000,00	1.866.000,00	1.116.000,00

Tabela 58 – Resumo das demandas e recurso disponível

Variável	Valor [R\$]
D1	465.000,00
D2	1.866.000,00
D3	1.116.000,00
Dt	3.447.000,00
RT	3.000.000,00

Para realizar distribuição racional do recurso disponível torna-se necessário aplicar o modelo 1 definido por (RAMALHO et al., 2019).

Conforme preconizado nas seções 4.3 e 5 torna-se necessário de definir os objetivos para realizar a alocação de recursos.

Para reduzirmos o risco operacional definiu-se os seguintes objetivos:

- Provisão de recursos predominante para subestações de energia com maior probabilidade de ocorrência operacional;
- Provisão predominante de recursos para subestações de energia com maior potencial de impacto ambiental, impacto de reputação, impacto produtivo e impacto financeiro.

As variáveis P_i e C_i da Tabela 56 são utilizadas para construir as seguintes funções objetivo:

$$F_1(X) = 0,418x_1 + 0,381x_2 + 0,498x_3 \rightarrow \max, \quad (30)$$

$$F_2(X) = 0,638x_1 + 0,825x_2 + 0,400x_3 \rightarrow \max. \quad (31)$$

Para este Estudo de Caso, adotou-se apenas dois objetivos visto a necessidade de respeitar os conceitos sobre risco: probabilidade e consequência.

A solução foi encontrada por meio do aplicativo *Adaptive Interactive Decision Making System (AIDMS2)* desenvolvido pelo Prof. Dr. Petr Ekel, Mateus Alberto Dorna de Oliveira e Igor Marques Reis, coautores da publicação principal desta pesquisa (W. MAIA et al., 2021). Ele implementa a alocação multiobjetivo de recursos baseada em conjuntos *fuzzy* (ou sua escassez), conforme descrito na seção 4.3. A Figura 16 demonstra a tela principal do aplicativo *AIDMS2*. Ressalta-se que este aplicativo pode ser utilizado em outros contextos onde seja necessário alocar recursos.

A solução para o problema de alocação de recursos financeiros está representada na Tabela 59. O resultado é considerado harmonioso (EKEL et al., 2006; PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2019; RAMALHO et al., 2019) e os níveis de satisfação das funções objetivo $F_1(X)$ e $F_2(X)$ são 0,5498 e 0,5498, respectivamente. Conforme a literatura correlata, valores iguais ou próximos são considerados harmoniosos (EKEL et al., 2006).

Tabela 59 – Resultado da alocação de recursos

Recurso disponibilizado	Valor R\$
x_1	R\$ 105.606,00
x_2	R\$ 1.866.000,00
x_3	R\$ 1.028.394,00

Número de Funções: 2 Número de Variáveis: 3

Informação Inicial das Funções

	Objetivo	x1	x2	x3
F(1)	Maximizar	0,418	0,381	0,498
F(2)	Maximizar	0,638	0,825	0,4

Alocação dos Recursos

x1	x2	x3
105606	1866000	1028394

Níveis de Satisfação

F(1)	F(2)
0,5498	0,5498

Fatores de Importância

F(1)	F(2)
1,00	1,00

Autovalor: 2,00

Recursos Disponíveis: 3000000

Precisão: 0,001

Restrições das Variáveis

	Demandas
x1	465000
x2	1866000
x3	1116000

Calcular

Figura 16 – Aplicativo AIDMS2.

7.2 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se um Estudo de Caso envolvendo três subestações de energia elétrica que teve por objetivo demonstrar a funcionalidade de método ARRS.

No Estudo de Caso, a Tabela 56 apresenta os níveis de risco das subestações. A análise dos resultados demonstrou que a subestação PS2 tem o nível de risco mais alto (Tabela 56 - 0,314), seguido por PS1 (Tabela 56 - 0,267) e PS3 (Tabela 56 - 0,199).

Os resultados da alocação de recursos financeiros (Tabela 59) indicam que as subestações de energia receberam: PS1: R\$ 105.606,00, PS2: R\$ 1.866.000,00 e PS3: R\$ 1.028.394,00. Esta alocação fornece a solução harmoniosa (EKEL et al., 2006; PEDRYCZ et al., 2011; EKEL et al., 2019).

Com base na análise da matriz de risco, é fácil observar que subestação de energia PS2 possui o maior risco e requer mais consideração do que as subestações PS3 e PS1. Em contrapartida, o PS3 tem o valor de probabilidade mais alto do que PS1 e PS2.

A análise da matriz sem considerar a otimização multiobjetivo pode levar a gastar todos os recursos em subestações de energia PS1 e PS2. Nesta situação, a subestação de energia PS3 não pode ser mantida e sua condição operacional pode ser comprometida.

Um dos resultados mais importantes desse trabalho é a alocação de recursos disponíveis com base na avaliação de risco, considerando simultaneamente os seguintes objetivos: probabilidade e consequência. O método ARRS minimiza erros evitando gastar todos os recursos financeiros em falhas altamente improváveis enquanto falhas menos graves podem se manifestar, se mais prováveis.

O modelo proposto visa estabelecer o nível de risco a partir de critérios que possam retratar condições inadequadas em todos os aspectos até a obtenção do estado da técnica. Em outras palavras, cria-se uma escala de avaliação matricial partindo de uma subestação de energia de alta confiabilidade operacional até uma com baixa confiabilidade. Desta forma é possível comparar um grupo específico de subestações de energia elétrica, levando em consideração os critérios de avaliação, a sua disposição e pesos atribuídos a cada um. Esse fator depende principalmente do envolvimento e experiência de cada especialista envolvido no processo de estruturação da avaliação de risco operacional.

Capítulo 8

Originalidade no trabalho

Nesta pesquisa, ferramentas metodológicas para considerar a informações de caráter qualitativo foram propostas e aplicadas para avaliar, comparar, priorizar e/ou ordenar as subestações do ponto de vista dos riscos operacionais e para alocar racionalmente os recursos disponíveis para redução de riscos.

A metodologia proposta permitiu que os especialistas expressem suas opiniões para definir critérios e subcritérios e seus respectivos pesos aplicando métodos de tomada de decisão multiatributo. Os vetores de peso são obtidos pelo método *AHP*. Sua aplicação, por meio da opinião de especialistas, proporcionou a redução das incertezas.

Os resultados da avaliação de risco da subestação de energia são gerados através da aplicação de questionários que utilizam escalas linguísticas. Além disso, a integração de critérios e subcritérios para a construção da matriz de risco permitiu a preparação de informações para alocação de recurso. Em particular, para as três subestações de energia, suas demandas e restrições foram estabelecidas. Além disso, os objetivos foram definidos para resolver o problema de alocação de recursos.

Os modelos $\langle X, F \rangle$ foram utilizados neste trabalho, pela primeira vez, para alocação de recursos em subestação de energia. Da mesma forma, a modificação da abordagem Bellman-Zadeh é aplicada para gerar soluções harmoniosas na análise de modelos $\langle X, F \rangle$.

Nesse contexto, a presente pesquisa visou desenvolver uma metodologia baseada em técnicas de tomada de decisão para reduzir subjetividade no processo de avaliação de riscos operacionais de subestações de energia. Este objetivo foi alcançado visto a implementação de métodos e modelos de tomada de decisão que permitem adotar a opinião de especialistas. Esta estratégia minimiza os erros e avaliações individuais tendenciosas (PEDRYCZ et al., 2011). Além disso, esta avaliação também considera pesos e questionários que utilizam variáveis linguísticas para reduzir tais incertezas (PEDRYCZ et al., 2011).

Os resultados da avaliação servem de base para a alocação dos recursos financeiros disponíveis no processo de gerenciamento de manutenção.

O Estudo de Caso também possui um aspecto original e fornece resultados úteis para engenheiros, gerentes que atuam, por exemplo, em empresas de mineração ou concessionárias de energia elétrica.

A principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento de um método que considera informações técnicas e de segurança para alocação de recursos na resolução problemas de risco operacional.

O principal fator inovador é a melhoria e redução da subjetividade dos modelos tradicionais de matriz de risco (por exemplo, (MARKOWSKI e MANNAN, 2008; DUIJM, 2015; RUAN et al., 2015; SUTTON, 2015; BAO et al., 2017; ISO, 2018; LI et al., 2018)) que permitiu a obtenção de estimativas de risco para a preparação de informações para a alocação de recurso. A adoção de grupo de especialistas minimiza erros durante o uso da matriz de risco (PEDRYCZ et al., 2011).

A aplicação de fundamentos metodológicos para construção e análise dos modelos $\langle X, F \rangle$ (como modelos multiobjetivo) para alocar racionalmente os recursos disponíveis para reduzir o risco operacional é outro fator inovador deste trabalho. Esta abordagem já foi amplamente utilizada para resolver vários problemas de engenharia de energia (por exemplo, (EKEL et al., 2016; RAMALHO et al., 2019)), e é utilizada nesta pesquisa, pela primeira vez, para alocação de recursos para resolver problemas de risco operacional.

A subestação de energia elétrica é um ativo importante para qualquer empresa, destacando a sua relevância no processo de controle, proteção e distribuição de energia elétrica nos parâmetros adequados. Na maioria dos casos, as grandes empresas possuem subestações de energia elétrica de diferentes idades, conceitos de projetos e estado de manutenção, o que complica ainda mais a identificação dos problemas relacionados ao risco operacional.

Do ponto de vista gerencial, torna-se necessário estabelecer uma visão sistêmica sobre as condições das subestações de energia elétrica, sendo necessário definir uma estratégia de avaliação, visto que os recursos são limitados e precisam ser utilizados de forma racional.

Vários tipos de incerteza são frequentemente encontrados no processo de avaliação do risco operacional de subestações de energia elétrica. Normalmente esse tipo de avaliação é realizado de forma empírica e por profissionais que não possuem uma visão sistêmica sobre o processo de manutenção e operação. Os efeitos colaterais ao problema apresentado podem, por exemplo, contribuir para a ocorrência dos seguintes itens:

- Ocorrência de acidentes de origem elétrica;
- Falha no fornecimento de energia elétrica nas unidades operacionais atendidas pela subestação de energia elétrica;

- Priorização inadequada dos recursos de mão-de-obra para manutenção do ativo;
- Gastos desnecessários com peças e componentes;
- Ocorrência de manutenções corretivas;
- Paradas não programadas;
- Baixa moral da equipe envolvida no processo de manutenção e operação da subestação de energia elétrica.

Associado a estes problemas, não existe na literatura correlata um método que permita realizar de forma eficaz esta avaliação de risco operacional em subestações de energia elétrica.

Como contribuição ampla deste trabalho é possível destacar a possibilidade de definir um primeiro critério de avaliação de risco operacional aplicável a subestações de energia elétrica.

Do ponto de vista de aplicação tecnológica, pretende-se utilizar os resultados no desenvolvimento de método direcionados à melhoria da segurança de pessoas, segurança operacional, confiabilidade, qualidade e eficiência econômica do fornecimento de energia elétrica.

Capítulo 9

Conclusões

A principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento de um método que considere informações técnicas e de segurança para alocação de recursos na resolução de problemas de risco operacional. Além disso, os modelos *AHP* e $\langle X, F \rangle$ são utilizados aqui pela primeira vez, para alocar os recursos disponíveis integrados aos conceitos de matriz de risco. A modificação da abordagem de Bellman-Zadeh é aplicada para gerar soluções harmoniosas na análise de modelos $\langle X, F \rangle$.

O método proposto gera adequadamente tais objetivos que orientam a distribuição de recursos financeiros entre as subestações de energia, que geralmente são limitados. A utilização racional dos recursos financeiros contribui para a prevenção de acidentes pessoais e materiais e redução das perdas de produção por falhas no processo de gestão.

Os resultados da pesquisa são ilustrados pela aplicação da metodologia em um Estudo de Caso de alocação de recursos financeiros visando reduzir os riscos de três subestações de energia. O diferencial desse método reside na possibilidade de reduzir a subjetividade da avaliação do risco da subestação de energia e elevar a qualidade das decisões tomadas para a alocação de recursos.

Além disso, o método ARRS define uma nova abordagem para a construção das matrizes de risco. Os resultados existentes relacionados às matrizes de risco estão concentrados em sua construção e aplicações, não considerando simultaneamente o total de recursos disponíveis, demandas e restrições de alocação de recursos para redução do risco operacional. Destaca-se também a construção de uma nova matriz de risco que contempla técnicas de ponderação para composição dos valores de probabilidade e consequência.

Os resultados do Estudo de Caso fornecem informações importantes para a alocação de recursos com base na avaliação de risco em subestações de energia. O método ARRS realiza a integração dos aspectos de segurança, técnicos, de gerenciamento e financeiros de subestações de energia de diferentes tecnologias, tamanhos e idades.

A metodologia tem características universais e pode ser utilizada em outros contextos, onde é necessário alocar recursos financeiros para reduzir riscos de qualquer natureza.

Este trabalho introduziu um novo método de avaliação de risco. O esquema proposto possui aspectos positivos: modelo matemático de fácil aplicação em nível de engenharia, possibilidade de uso em diversos contextos de avaliação de risco, necessidade de baixa capacidade computacional, definição e aplicação de pesos nos critérios e subcritérios de forma mais racional.

O método denominado ARRS permitiu identificar quais subestações de energia elétrica apresentam o maior grau de risco operacional. A metodologia proposta contou com a aplicação simultânea de diversificadas técnicas de análise de risco associadas à tomada de decisão. Com a aplicação do método *AHP* foi possível certificar-se de que os valores ponderados possuem uma interligação matemática racional.

A aplicação de múltiplos critérios na avaliação de risco proporcionou uma análise sistêmica do ativo. Aspectos de segurança, operacionais e financeiros foram contemplados de forma simultânea e utilizou critérios e subcritérios considerados relevantes pelos especialistas.

No que diz respeito a avaliação das subestações de energia elétrica foi possível reduzir a subjetividade por meio da aplicação do método ARRS. Este objetivo foi alcançado utilizando a opinião de especialistas para ponderar e avaliar de forma padronizada as subestações de energia elétrica. O uso de questionários em conjunto com variáveis linguísticas na avaliação minimizou o problema existente relacionado à subjetividade.

A análise comparativa demonstrou que existem subestações de energia elétrica que necessitam ser mantidas prioritariamente. Esta informação será útil para que os gestores possam realizar uma tomada de decisão mais assertiva quanto a aplicação de investimentos.

O desenvolvimento do método foi necessário visto que as normas, métodos existentes e trabalhos correlacionados não possuem um objetivo específico para realizar uma análise de risco sistêmica de subestações de energia elétrica.

Outro aspecto relevante está relacionado à possibilidade de se aplicar uma avaliação de risco em uma mesma base matemática. Desta forma é possível realizar a comparação com subestações de energia elétrica de porte, idade e tecnologias distintas.

O método pode ser considerado de fácil aplicação visto que não são utilizados cálculos e metodologias complexas. Sistemas informatizados populares como, por exemplo, *MS Excel* podem ser utilizados em sua implementação. Identifica-se a possibilidade de utilização do método ARRS em outros contextos visto a flexibilidade do modelo matemático.

Por fim destaca-se a contribuição da pesquisa no que diz respeito a segurança operacional em subestações de energia elétrica. O principal ganho esperado com o uso na metodologia é a contribuição na redução da ocorrência de acidentes pessoais em subestações de energia elétrica provocadas por falhas nos processos de operação e manutenção do ativo. A impossibilidade de identificar problemas devido a falta de metodologia específica pode contribuir para a ocorrência de situações indesejadas.

Capítulo 10

Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros pode-se apontar:

- Integração do modelo proposto com o método Bowtie descrito na seção 3.4.5;
- Utilização de dados de confiabilidade e estatísticas de falhas em conjunto com método proposto nesta pesquisa;
- Adição de novos objetivos para realizar a alocação de recursos para aprimorar os resultados;
- Aprimoramento da matriz de risco utilizando números *fuzzy* e método *AHP*;
- Simplificação do método ARRS de forma a reduzir o tempo de aplicação durante a fase de coleta de dados em campo;
- Aplicação de modelos de inteligência artificial em conjunto com método ARRS em situações onde haja disponibilidade de banco de dados confiáveis.

Referências

- M. ABDELGAWAD. Risk Management in the Construction Industry Using Combined Fuzzy FMEA and Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering & Management*, 136(9):1028–1036, Sept. 2010. ISSN 07339364. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000210. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=52929143&lang=pt-br&site=ehost-live&authtype=ip,cookie,uid>.
- AUSTRALIA. S/NZS 4360:1999 Risk management, 1999.
- A. D. BAKA e N. K. UZUNOGLU. Analysis of Two Electrocution Accidents in Greece that Occurred due to Unexpected Re-energization of Power Lines. *Safety and Health at Work*, 5(3):158–160, 2014. ISSN 2093-7911. doi: 10.1016/j.shaw.2014.06.006. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2093791114000481>.
- C. BAO, D. Wu, J. Wan, J. Li, e J. Chen. Comparison of Different Methods to Design Risk Matrices from The Perspective of Applicability. *5th International Conference on Information Technology and Quantitative Management, ITQM 2017*, 122:455–462, Jan. 2017. ISSN 1877-0509. doi: 10.1016/j.procs.2017.11.393. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917326388>.
- L. A. BELLMAN e R. E. ZADEH. Decision-making in a fuzzy environment. *Management science*, 17(4):B–141, 1970.
- P. BERNARDES, P. Ekel, J. Kotlarewski, e R. Parreiras. Fuzzy set based multicriteria Decision making and its applications. *Progress in Nonlinear Analysis Reserach*, page 243, 2008. doi: 10.1016/j.camwa.2006.08.013.
- P. BERNARDES, P. EKEL, e R. PARREIRAS. A new consensus scheme for multicriteria group decision making under linguistic assessments. *Mathematics and Mathematical Logic: New Research*, pages 67–86, 2009.
- R. BERREDO, P. Y. Ekel, J. Martini, R. Palhares, R. Parreiras, e J. Pereira. Decision making in fuzzy environment and multicriteria power engineering problems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(3):623–632, 2011.

- B. C. BRENNER. Improving workplace Electrical Safety through Self-Assessment. In *Electrical Safety Workshop (ESW), 2013 IEEE IAS*, pages 163–166. IEEE, 2013.
- BSI. ISO 45001:2018 Occupational Health and Safety Management, 2018.
- V. N. BURKOV, V. V. KONDRAT'EV, e KONDRAT'EV. Mechanisms of Functioning Organizational Systems Moscow:Nauka. 1981.
- R. CAMPBELL. Fatal electrical injuries at work. *National Fire Protection Association (NFPA)*, I:21, 2018. URL <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Electrical/osFatalElectricalInjuries.pdf>.
- J. C. CAWLEY. Electrical accidents in the mining industry, 1990-1999. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(6):1570–1577, Dec. 2003. ISSN 1939-9367. doi: 10.1109/TIA.2003.818963.
- R. L. COLLINS. Integrating job safety analysis into process hazard analysis. *Process Safety Progress*, 29(3):242–246, Sept. 2010. ISSN 1066-8527. doi: 10.1002/prs.10369. URL <https://onlinelibrary-wiley.ez27.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1002/prs.10369>.
- A. L. COX JR. What's Wrong with Risk Matrices? *Risk Analysis*, 28(2):497–512, 2008. ISSN 0272-4332. doi: 10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x>. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd.
- D. T. ROBERTS. Applying Risk Assessment at the Worker Level: Applications to Electrical Safety. *IEEE Industry Applications Magazine*, 25(1):18–24, Feb. 2019. ISSN 1558-0598. doi: 10.1109/MIAS.2018.2868345.
- Z. DAI, Z. Wang, e Y. Jiao. Reliability Evaluation of the Communication Network in Wide-Area Protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(4):2523–2530, Oct. 2011. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2157948.
- N. DALKEY. An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management science*, 9(3):458–467, 1963.
- A. DIMOPOULOS, H. Griffiths, N. Harid, A. Haddad, A. Ainsley, D. Guo, e G. Mpofu. Proposal for probabilistic risk assessment in grounding systems and its application to transmission substations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4):2219–2226, 2012.

- DOLEZILEK. Decision-making information from substation IEDs drives equipment life extension, modernization, and retrofitting. In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, pages 1–7. IEEE, 2011.
- N. J. DUIJM. Recommendations on the use and design of risk matrices. *Safety Science*, 76:21–31, July 2015. ISSN 0925-7535. doi: 10.1016/j.ssci.2015.02.014. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753515000429>.
- J. DUNJO, V. Fthenakis, J. A. Vilchez, e J. Arnaldos. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. *Journal of Hazardous Materials*, 173 (1-3):19–32, Jan. 2010. ISSN 03043894. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.076. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389409013727>.
- I. N. DURBACH e T. J. Stewart. Modeling uncertainty in multi-criteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*, 223(1):1–14, Nov. 2012. ISSN 0377-2217. doi: 10.1016/j.ejor.2012.04.038. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712003591>.
- U. C. EHLERS, E. O. Ryeng, E. McCormack, F. Khan, e S. Ehlers. Assessing the safety effects of cooperative intelligent transport systems: A bowtie analysis approach. *Accident Analysis & Prevention*, 99:125–141, Feb. 2017. ISSN 00014575. doi: 10.1016/j.aap.2016.11.014. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001457516304171>.
- P. EKEL. Approach to decision making in fuzzy environment. *Computers & Mathematics with Applications*, 37(4):59–71, 1999. ISSN 0898-1221. doi: 10.1016/S0898-1221(99)00059-0. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122199000590>.
- P. EKEL e R. PARREIRAS. Esquema de consenso para decisão em grupo por meio de avaliações linguísticas. *XL SBPO 2008 - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento*, pages 962–973, 2008.
- P. EKEL, W. PEDRYCZ, e R. SCHINZINGER. A general approach to solving a wide class of fuzzy optimization problems. *Fuzzy Sets and Systems*, 97(1): 49–66, July 1998. ISSN 0165-0114. doi: 10.1016/S0165-0114(96)00334-X. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016501149600334X>.
- P. EKEL, C. Martins, J. Pereira, R. Palhares, e L. Canha. Fuzzy set based multiobjective allocation of resources and its applications. *Global Optimization, Control and Games*, V, 52(1):197–210, July 2006. ISSN 0898-1221. doi: 10.1016/j.camwa.2006.08.013. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122106001908>.

- P. EKEL, J. Queiroz, R. Parreiras, e R. Palhares. Fuzzy set based models and methods of multicriteria group decision making. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 71(12):e409–e419, 2009. doi: 10.1016/j.na.2008.11.087. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0362546X08006664>.
- P. EKEL, I. Kokshenev, R. Palhares, R. Parreiras, e F. Schuffner Neto. Multicriteria analysis based on constructing payoff matrices and applying methods of decision making in fuzzy environment. *Optimization and Engineering*, 12(1):5–29, Mar. 2011. ISSN 1573-2924. doi: 10.1007/s11081-010-9108-0. URL <https://doi.org/10.1007/s11081-010-9108-0>.
- P. EKEL, I. Kokshenev, R. Parreiras, W. Pedrycz, e J. P. Jr. Multiobjective and multiattribute decision making in a fuzzy environment and their power engineering applications. *Information Sciences*, 361 - 362:100 – 119, 2016. ISSN 0020-0255. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2016.04.030>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025516302730>.
- P. EKEL, W. PEDRYCZ, e J. PERREIRA_JR. *Multicriteria decision-making under conditions of uncertainty: a fuzzy set perspective*, volume 1. Willey & Sons, 1 edition, Dec. 2019. ISBN 978-1-119-53492-1.
- P. Y. EKEL. Fuzzy sets and models of decision making. *Computers & Mathematics with Applications*, 44(7):863–875, 2002.
- P. Y. EKEL e E. A. GALPERIN. Box-triangular multiobjective linear programs for resource allocation with application to load management and energy market problems. *Mathematical and Computer Modelling*, 37(1):1–17, Jan. 2003. ISSN 0895-7177. doi: 10.1016/S0895-7177(03)80001-8. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717703800018>.
- P. Y. EKEL, M. MENEZES, e F. H. S. NETO. Decision making in a fuzzy environment and its application to multicriteria power engineering problems. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 1(4):527–536, 2007.
- H. L. FLOYD. A systems safety approach to occupational electrical safety. In *Cement Industry Technical Conference (CIC), 2014 IEEE-IAS/PCA*, pages 1–17. IEEE, 2014.
- M. FOTUHI-FIRUZABAD, F. Aminifar, e I. Rahmati. Reliability Study of HV Substations Equipped With the Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2):610–617, Apr. 2012. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2179122.

- R. REEMAN. Simplified uncertainty analysis of layer of protection analysis results. *Process Safety Progress*, 32(4):351–360, Dec. 2013. ISSN 1547-5913. doi: 10.1002/prs.11585. URL <https://onlinelibrary-wiley.ez27.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1002/prs.11585>.
- GAO, Z. Dai, Y. Peng, e H. Lu. Cyber Security Risk Assessment of Communication Network of Substation Based on Improved Grey Clustering. In *2014 Tenth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, pages 524–527, Aug. 2014. doi: 10.1109/IIH-MSP.2014.136.
- P. GILL. *Electrical power equipment maintenance and testing*, volume 1. CRC Press, 2nd edition, 2008. ISBN 978-1-57444-656-2.
- J. GUO, Y. Bao, B. Yu, Z. Zeng, L. Wang, e C. Guo. Security risk assessment and weaknesses identification of the substation automation system. In *Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on*, pages 1881–1888. IEEE, 2014.
- C. N. HJORTS. Enhancing public participation in natural resource management using Soft OR -an application of strategic option development and analysis in tactical forest planning. *European Journal of Operational Research*, 152(3):667–683, 2004.
- W.-K. K. HSU, S.-H. S. HUANG, e W.-J. TSENG. Evaluating the risk of operational safety for dangerous goods in airfreights – A revised risk matrix based on fuzzy AHP. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48:235–247, 2016. ISSN 1361-9209. doi: 10.1016/j.trd.2016.08.018. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920915301814>.
- Y.-S. HUANG, W.-C. Chang, W.-H. Li, e Z.-L. Lin. Aggregation of utility-based individual preferences for group decision-making. *European Journal of Operational Research*, 229(2):462–469, 2013. ISSN 0377-2217. doi: 10.1016/j.ejor.2013.02.043. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221713001926>.
- E. ILBAHAR, S. CEBI, e C. KAHRAMAN. A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making. *Energy Strategy Reviews*, 25:18–33, 2019. ISSN 2211-467X. doi: 10.1016/j.esr.2019.04.014.
- E. S. F. INTERNATIONAL. Workplace Electrical Injury and Fatality Statistics, 2003-2010. *Rosslyn, VA: ESFI*, 2012.
- A. ISHAK, ASFRIYATI, e V. Akmaliah. Analytical Hierarchy Process and PROMETHEE as Decision Making Tool: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 505:012085, July 2019. ISSN 1757-

- 899X. doi: 10.1088/1757-899x/505/1/012085. URL <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/505/1/012085>. Publisher: IOP Publishing.
- ISO. *International Organization for Standardization - BS ISO 31000:2018 - Risk management - Principles and guidelines*. International Organization for Standardization, Geneva, 2018. ISBN 978-0-580-67571-3. OCLC: 768097201.
- ISO. *International Organization for Standardization - BS ISO 31010:2019 - Risk management - Risk management techniques*. International Organization for Standardization, 2019.
- J. R. WHITE e S. JAMIL. Electrical Incidents and How they Relate to NFPA 70E/CSA Z462. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(4):3315–3321, Aug. 2020. ISSN 1939-9367. doi: 10.1109/TIA.2020.2991660.
- J. JAISE, N. B. Ajay Kumar, N. S. Shanmugam, K. Sankaranarayananasamy, e T. Ramesh. Power system: a reliability assessment using FTA. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 4(1):78–85, Mar. 2013. ISSN 0976-4348. doi: 10.1007/s13198-012-0100-2. URL <https://doi.org/10.1007/s13198-012-0100-2>.
- S. JANSEN. The Multi-attribute Utility Method. pages 101–125. 2011. doi: 10.1007/978-90-481-8894-9_5.
- S. JANSEN, H. COOLEN, e R. GOETGELUK. *The Measurement and Analysis of Housing Preference and Choice*. Springer, Dordrecht., Jan. 2011. ISBN 978-90-481-8893-2. doi: 10.1007/978-90-481-8894-9.
- G. JINGJIANG. A classification model for inventory management of spare parts and its application. In *Industrial Control and Electronics Engineering (ICICEE), 2012 International Conference on*, pages 592–595. IEEE, 2012.
- J. KANG, L. Sun, e C. Guedes Soares. Fault Tree Analysis of floating offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 133:1455–1467, Apr. 2019. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2018.08.097. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148118310474>.
- J. KOUSTELLIS, C. Halevidis, A. Polykrati, e P. Bourkas. Analysis of a fatal electrical injury due to improper switch operation. *Safety Science*, 53:226–232, Mar. 2013. ISSN 0925-7535. doi: 10.1016/j.ssci.2012.10.005. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753512002597>.
- S. S. KUDRYAVTSEV, P. V. Yemelin, e N. K. Yemelina. The Development of a Risk Management System in the Field of Industrial Safety in the Republic

- of Kazakhstan. *Safety and Health at Work*, 9(1):30–41, Mar. 2018. ISSN 2093-7911. doi: 10.1016/j.shaw.2017.06.003. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2093791117300392>.
- L. WEI, Y. Ya-nan, D. Wei-dong, e Z. Bo. Study on financial risk assessment of substation project based on Monte Carlo simulation. In *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*, pages 62–65, May 2011. doi: 10.1109/ICCSN.2011.6014389.
- W. J. LANNES. Cost-Effectiveness Analysis of Substation Arrangements. *IEEE Transactions on Reliability*, R-31(4):404–409, Oct. 1982. ISSN 0018-9529. doi: 10.1109/TR.1982.5221395.
- J. LI, C. Bao, e D. Wu. How to Design Rating Schemes of Risk Matrices: A Sequential Updating Approach. *Risk Analysis*, 38(1):99–117, Jan. 2018. ISSN 0272-4332. doi: 10.1111/risa.12810. URL <https://doi.org/10.1111/risa.12810>. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd.
- M. LIBÓRIO, W. Maia, C. Martins, P. Ekel, S. Laudares, e P. Bernardes. Reducing Costs of Preventive Lightning Systems by Locational Optimization. *GOT - Geography and Spatial Planning Journal*, 20:149–166, 2020. doi: 10.17127/got/2020.20.007.
- Y. LIU, L. Wotherspoon, N.-K. C. Nair, e D. Blake. Quantifying the seismic risk for electric power distribution systems. *Structure and Infrastructure Engineering*, pages 1–16, Mar. 2020. ISSN 1573-2479. doi: 10.1080/15732479.2020.1734030. URL <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1734030>. Publisher: Taylor & Francis.
- LYU HAI-MIN, Sun Wen-Juan, Shen Shui-Long, e Zhou An-Nan. Risk Assessment Using a New Consulting Process in Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(3):04019112, Mar. 2020. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001757. URL [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001757](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001757). Publisher: American Society of Civil Engineers.
- W. F. S. MAIA e P. EKEL. Expert Opinion-Based Power Substation Risk Assessment For Prevention Of Accidents. In *Live issues of energy saving as a requirement of life safety*, page 5, Kyiv, Ukraine, June 2018. National Technical University Of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. ISBN 978-966-699-935-4.
- A. S. MARKOWSKI e M. S. MANNAN. Fuzzy risk matrix. *Papers Presented at the 2006 Annual Symposium of the Mary Kay O'Connor Process Safety Center*, 159 (1):152–157, Nov. 2008. ISSN 0304-3894. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.055. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389408004019>.

- J. D. MCDONALD. *Electric power substations engineering*. CRC press, 2012.
- J. D. MCDONALD. *Electric Power Substations Engineering*, volume 1. CRC Press, 3th edition, 2016.
- D. ORRISON, M. Fecke, e J. Ramirez. Using layer of protection analysis to understand necessary safeguards for steam boiler operation. *Process Safety Progress*, 31(3):248–254, Sept. 2012. ISSN 1547-5913. doi: 10.1002/prs.11500. URL <https://onlinelibrary-wiley.ez27.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1002/prs.11500>.
- MTE. Brazilian standard: NR-10 Safety in Installations and Services in Electricity, July 2019.
- NFPA. *NFPA 70E: Standard For Electrical Safety In The Workplace*. National Fire Protection Association (NFPA), 2015.
- NFPA. *NFPA 70E: Standard For Electrical Safety In The Workplace*. National Fire Protection Association (NFPA), 2018.
- S.-i. OHNISHI, T. Yamanoi, e H. Imai. A kind of fuzzy weights representation for inner dependence AHP. In *Fuzzy Systems (FUZZ), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- B. OMIDVAR, R. AZIZI, e Y. ABDOLLI. Seismic Risk Assessment of Power Substations. *Environmental Energy and Economics International Research*, 1: 45–62, Jan. 2014. doi: 10.22097/eeer.2017.46456.
- S. ORLOVSKY. Decision-making with a fuzzy preference relation. *Fuzzy sets and systems*, 1(3):155–167, 1978.
- P. Y. EKEL, L. D. B. Terra, M. F. D. Junges, A. V. Prakhovnik, e O. V. Razumovsky. Multicriteria load management in power systems. In *DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Cat. No.00EX382)*, pages 167–172, Apr. 2000. doi: 10.1109/DRPT.2000.855658.
- R. PARREIRAS, P. Y. Ekel, J. Martini, e R. M. Palhares. A flexible consensus scheme for multicriteria group decision making under linguistic assessments. *Information Sciences*, 180(7):1075–1089, 2010. doi: 10.1016/j.ins.2009.11.046. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025509005246>.
- R. PARREIRAS, P. EKEL, e F. BERNARDES. A dynamic consensus scheme based on a nonreciprocal fuzzy preference relation modeling. *Information Sciences*, 211: 1–17, 2012a. doi: 10.1016/j.ins.2012.05.001.

- R. PARREIRAS, P. Y. Ekel, e D. Morais. Fuzzy set based consensus schemes for multicriteria group decision making applied to strategic planning. *Group Decision and Negotiation*, 21(2):153–183, 2012b. doi: 10.1007/s10726-011-9231-0.
- W. PEDRYCZ, P. EKEL, e R. PARREIRAS. *Fuzzy multicriteria decision-making: models, methods and applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- J. G. PERREIRA JR. *Modelos e Métodos de Tomada de Decisões Multiobjetivo em Ambiente com Incertezas e Suas Aplicações*. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2014.
- H. RAIFFA. *Decision analysis: introductory lectures on choices under uncertainty*. 1968.
- F. D. RAMALHO, P. Y. Ekel, W. PEDRYCZ, J. G. Pereira Júnior, e G. L. Soares. Multicriteria decision making under conditions of uncertainty in application to multiobjective allocation of resources. *Information Fusion*, 49:249–261, 2019. ISSN 1566-2535. doi: 10.1016/j.inffus.2018.12.010. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156625351830157X>.
- F. D. RAMALHO, I. S. Silva, P. Y. Ekel, C. A. P. d. S. Martins, P. Bernardes, e M. P. Libório. Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats. *MethodsX*, 8:101371, Jan. 2021. ISSN 2215-0161. doi: 10.1016/j.mex.2021.101371. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016121001643>.
- L. Raskin. *Análise de Sistemas Complexos e Elementos da Teoria de Controle Ótimo*. Sovetskoe Radio. 1976.
- O. ROZENFELD, R. Sacks, Y. Rosenfeld, e H. Baum. Construction Job Safety Analysis. *Safety Science*, 48(4):491–498, Apr. 2010. ISSN 09257535. doi: 10.1016/j.ssci.2009.12.017. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925753509002288>.
- X. RUAN, Z. YIN, e D. M. FRANGOPOL. Risk Matrix Integrating Risk Attitudes Based on Utility Theory. *Risk Analysis*, 35(8):1437–1447, 2015. ISSN 0272-4332. doi: 10.1111/risa.12400. URL <https://doi.org/10.1111/risa.12400>. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd.
- S. D. PARK. Painful Memories of an Electrical Accident. In *2019 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW)*, pages 1–4, Mar. 2019. ISBN 2326-330X. doi: 10.1109/ESW41045.2019.9024749. Journal Abbreviation: 2019 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW).

- T. L. SAATY. The analytical hierarchical process. *J Wiley, New York*, 1980.
- T. L. SAATY. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1):9–26, 1990.
- T. L. SAATY. *Group decision making: drawing out and reconciling differences*. RWS publications, 2013.
- T. L. SAATY, L. G. VARGAS, e K. DELLMANN. The allocation of intangible resources: the analytic hierarchy process and linear programming. *Socio-Economic Planning Sciences*, 37(3):169–184, Sept. 2003. ISSN 0038-0121. doi: 10.1016/S0038-0121(02)00039-3. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012102000393>.
- T. L. SAATY, K. PENIWATI, e J. S. SHANG. The analytic hierarchy process and human resource allocation: Half the story. *Decision Making with the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process*, 46(7):1041–1053, 2007. ISSN 0895-7177. doi: 10.1016/j.mcm.2007.03.010. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717707000842>.
- A. SAEDI, J. Thambirajah, e P. Agamuthu. A HIRARC model for safety and risk evaluation at a hydroelectric power generation plant. *Safety Science*, 70:308–315, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2014.05.013>. URL <https://scholar.googleusercontent.com/scholar.bib?q=info:ZQqVcyImgioJ:scholar.google.com/&output=citation&scisig=AAGBfm0AAAAAXHq-h5HdDqeVJbBdrsmR1RpDPFmYJ0e4&scisf=4&ct=citation&cd=0&hl=pt-BR>.
- L. M. SILVA, P. Ekel, D. Vieira, e G. L. Soares. Multiattribute Spatial Decision-Making for Qualitative Information Processing as Applied to the Renewable Energy Generating Sites Prospection. *IEEE Access*, 8:137745–137757, 2020. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012098.
- I. P. SIQUEIRA. Risk assessment of major accidents in large electric power plants. In *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES*, pages 1–7. IEEE, 2010.
- V. SKLYAROV, PRAKHOVNIK, e P. EKEL. On the multicriteria power consumption control. *Electronic Modeling*, pages 61–65, 1987.
- E. D. SMITH, W. T. SIEFERT, e D. DRAIN. Risk matrix input data biases. *Systems Engineering*, 12(4):344–360, 2009. ISSN 1098-1241. doi: 10.1002/sys.20126. URL <https://doi.org/10.1002/sys.20126>. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd.

- J. G. P. J. J. B. d. SOUSA. *Manual de Auxílio na Interpretação e Aplicação da NR10*. Ministério do Trabalho e Emprego, superintendência regional do trabalho e emprego – srte/sp edition, 2010.
- I. SUTTON. Chapter 1 - Risk Management. In I. Sutton, editor, *Process Risk and Reliability Management (Second Edition)*, pages 1–64. Gulf Professional Publishing, Oxford, Jan. 2015. ISBN 978-0-12-801653-4. doi: 10.1016/B978-0-12-801653-4.00001-1. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128016534000011>.
- H. TANAKA, S. Tsukao, D. Yamashita, T. Niimura, e R. Yokoyama. Multiple Criteria Assessment of Substation Conditions by Pair-Wise Comparison of Analytic Hierarchy Process. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4):3017–3023, Oct. 2010. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2010.2048437.
- J. TAYLOR. Automated HAZOP revisited. *Process Safety and Environmental Protection*, 111:635–651, Oct. 2017. ISSN 09575820. doi: 10.1016/j.psep.2017.07.023. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582017302379>.
- R. V. VARGAS. Utilizando a Programação Multicritério (Analytic Hierarchy Process – AHP) para Selecionar e Priorizar Projetos na Gestão de Portfólio. *PMI Global Congress 2010 – North America*, pages 1–22, 2010.
- M. VERMA, A. Kumar, Y. Singh, e T. Allahviranloo. Application of non-normal p-norm trapezoidal fuzzy number in reliability evaluation of electrical substations. *Neural Computing and Applications*, 23(2):531–539, 2013.
- W. MAIA, P. Ekel, D. A. G. Vieira, E. A. De Castro, M. A. D. De Oliveira, I. M. Reis, e K. M. G. Dos Santos. Evaluation of Operational Risk in Power Substations and Its Rational Reduction on the Basis of Multicriteria Allocating Resources. *IEEE Access*, pages 1–1, 2021. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3124529.
- Z. ZOU, Y. Hou, H. Yang, M. Li, B. Wang, e Q. Guo. Research and Implementation of Intelligent Substation Information Security Risk Assessment Tool. In *2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*, pages 1306–1310, May 2019. doi: 10.1109/ITAIC.2019.8785820.
- ZARTHA, HALAL, e HERNANDEZ. Delphi method: analysis of rounds, stakeholder and statistical indicators. *foresight*, 21(5):525–544, Jan. 2019. ISSN 1463-6689. doi: 10.1108/FS-11-2018-0095. URL <https://doi.org/10.1108/FS-11-2018-0095>. Publisher: Emerald Publishing Limited.
- J. ZHANG, J. C. FAN, e L. B. ZHANG. The application of fuzzy decision-making in the solving of petroleum and petrochemical accident probability. In *Fuzzy Systems*

and Knowledge Discovery, 2009. FSKD'09. Sixth International Conference on, volume 7, pages 386–391. IEEE, 2009.

ZHOU, J. Ding, J. Chen, W. Tao, e J. Li. Risk assessment for substation secondary system using graph theory and risk contagion model. In *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, pages 66–71, Oct. 2017. doi: 10.1109/CAC.2017.8242738. Journal Abbreviation: 2017 Chinese Automation Congress (CAC).

Apêndice A

Artigo principal publicado - IEEE
2021

Received October 1, 2021, accepted October 21, 2021, date of publication November 1, 2021, date of current version November 10, 2021.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2021.3124529

Evaluation of Operational Risk in Power Substations and Its Rational Reduction on the Basis of Multicriteria Allocating Resources

WILLIAN MAIA¹, PETR EKEL^{1,2}, DOUGLAS ALEXANDRE GOMES VIEIRA³,
EDUARDO ANTÔNIO DE CASTRO¹, MATEUS ALBERTO DORNA DE OLIVEIRA²,
IGOR MARQUES REIS², AND KENEDY MARCONI GERALDO DOS SANTOS⁴

¹Graduate Program in Electrical Engineering, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais 31270-901, Brazil

²Graduate Program in Electrical Engineering, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais 30535-012, Brazil

³Graduate Program in Mathematical Modeling, Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais 30510-000, Brazil

⁴Graduate Program in Electrical Engineering, Federal Institute of Education, Science and Technology of Bahia, Vitória da Conquista, Bahia 45078-300, Brazil

Corresponding author: Willian Maia (willianmaia1@yahoo.com.br)

This work was supported in part by the Vale S.A., through the Research, Development, and Innovation Partnership Agreement, and in part by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Brazil (CNPq), under Grant 311032/2016-8 and Grant 310516/2018-8.

ABSTRACT The present work aimed at improving the quality of operational risk estimation for power substations and increasing the efficiency in its reduction using models and methods of multicriteria decision-making. The application of the proposed methodology allows one to assess, compare, prioritize, and/or order power substations from the point of view of operational risks and to rationally allocate available resources to reduce operational risks. It is presented a method of Systemic Risk Assessment (SRA) that integrates concepts of risk assessment and multicriteria decision-making techniques. The use of SRA permits one to take into account expert opinions to obtain the operational risk estimates. These estimates serve for allocating resources between substations within the framework of multicriteria models. The analysis is based on applying the Bellman-Zadeh approach to decision-making in a fuzzy environment to solve multicriteria problems and provide their harmonious solutions. The risk assessment results of the three power substations show that the power substation (PS)2 has the highest risk level (0.314), followed by PS1 (0.267), and PS3 (0.199), and the allocation of financial resources between the substations is the following: PS1: R\$ 465,000.00, PS2: R\$ 1,714,339.00 and PS3: R\$ 820,661.00. The Case Study, demonstrates the possibility of reducing the subjectivity of the risk evaluation and the improvement of the quality of the decisions made in resource allocation.

INDEX TERMS Accident prevention, allocation of resources, AHP, Bellman-Zadeh approach, decision making, Electrical safety, substations, risk analysis, risk assessment, risk matrix.

I. INTRODUCTION

Electricity is an indispensable form of energy for functioning different segments of the industry and also for human life. However, the improper use of electricity can result in injury to workers, including fatalities, and damage to electrical equipment, which causes production losses [1]–[6]. In addition, expenses with lawsuits and fines imposed by inspection agencies can be generated [7]. The decrease in the frequency of accidents of electrical origin compared to other types of

risks may lead to a misconception that the electrical hazard management of electrical risks is under control [6]–[8]. Although these accidents are rare when they do occur, they are usually serious and, can lead to fatal outcomes [3]. Considering this, the implementation of qualified management to reduce the risks involved in the process of operating power substations has become necessary in the activities of companies, which realize the corresponding management [6], [7]. The complexity of carrying out a risk assessment is a major challenge for these companies [9]. The determination of the most critical substations in terms of operational safety is necessary, for the rational use of limited financial resources.

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Wai-Keung Fung.

Apêndice B

Certificado de participação em
conferência internacional

Neste apêndice encontra-se o certificado de participação da conferência internacional "Live Issues Of Energy Saving As Arequirement Of Live Safety", organizado pela National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ucrânia, junho de 2018: EXPERT OPINION-BASED POWER SUBSTATION RISK ASSESSMENT FOR PREVENTION OF ACIDENTS.

Figura 17 – Certificado de participação.



Fonte: National Technical University of Ukraine

Apêndice C


Matéria sobre evento e artigo
publicado em conferência

Neste apêndice encontra-se a reportagem sobre o evento citado, destacando a representação do Brasil por meio dos autores do artigo página 3 (Em Ucrainiano).

Figura 18 – Reportagem no site sobre a conferência.

Home

Международная конференция "Актуальные вопросы энергосбережения как требование безопасности жизнедеятельности"



Международная научно-практическая конференция "Актуальные вопросы энергосбережения как требование безопасности жизнедеятельности" состоялась 7-8 июня 2018 года в КПИ им. Игоря Сикорского. Ее инициаторами и организаторами выступили Институт энергосбережения и энергоменеджмента КПИ им. Игоря Сикорского (кафедра охраны труда, промышленной и гражданской безопасности и кафедры электроснабжения), Киевский национальный университет технологий и дизайна и общественная организация - Международная академия безопасности жизнедеятельности. В работе конференции приняли участие 107 ученых из 12 стран - Бразилии, Азербайджана, Болгарии, Казахстана, Кении, Мьянмы, Норвегии, Польши, Японии, США и др. Учитывая разноплановые интересы докладчиков и направления научных исследований, в сборник докладов включено 59 статей по четырем разделам: актуальные вопросы получения и сохранения энергии; безопасность человека в современных энергоёмких и энергоопасных условиях; новейшие технологии и оборудование для энергобезопасных работ; охрана труда как залог безопасности современных энергосберегающих технологий.

Академик НАН Украины, д.т.н. Г.Г.Пивняк (Национальный горный университет, г. Днепр), д.т.н. И.В.Жежеленко (Приазовский технический университет, г. Мариуполь), д.т.н. Г.Г.Трофимов (Алматинский университет энергетики и связи, Казахстан), к.т.н. Ю.А.Папанка (Национальный горный университет, Днепр) вынесли на обсуждение актуальное для развития промышленности Украины направление исследований: влияние качества электроэнергии на надежность электроснабжения. Предложен комплексный подход к решению этой проблемы путем внедрения новой нормативной базы.

Выступление представителей Института технической теплофизики НАН Украины (г. Киев) чл.-корр. НАН Украины, д.т.н. Б.И.Басока и к.т.н. М.П. Новицкой было посвящено повышению эффективности использования тепловой энергии в современном градостроительстве. Ученые из Азербайджанского ТУ д.т.н. Е.Г.Исмибейли и к.т.н. И.Дж.Исламов разработали новые обобщающие математические модели электромагнитных полей, которые позволяют существенно уменьшить трудозатраты и оперативно контролировать процесс моделирования.

Ученые Gusuiev M. (Japan), Odhiambo C.O. (Kenya), Hasegawa A. (Japan), Thu M.M. (Myanmar), к.т.н. А.Гусев (КПИ им. Игоря Сикорского) сделали доклад по вопросам влияния энергетических процессов на изменение климата в африканских и азиатских странах. Willian Felipe Silva Maia (Brazil) и Peter Ekel (Brazil) выложили метод оценки рисков, влияние которых приводит к несчастным случаям. Полученные результаты позволили ранжировать опасные и вредные производственные факторы. Сравнительный анализ уровня социального страхования в Украине и Польше было приведено в докладе доцента Университета технологий и дизайна (г. Киев), к.т.н. Ю.В.Кляцкова и магистра О.А.Исеева (Poland).

Apêndice D

Jornal sobre evento e artigo
publicado em conferência



ЗАСНОВАНА 21 КВІТНЯ 1927 РОКУ ВИХОДИТЬ ЩОТИЖНЯ

Київський Політехнік

ГАЗЕТА НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Безкоштовно

20 вересня 2018 року

№25 (3241)



Т. Лодигівський і М. Згурівський

3 вересня 2018 року ректор Познанського технологічного університету професор Томас Лодигівський вручив медаль "За заслуги перед Познанським технологічним університетом" ректору Національного тех-

нічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" академіку НАН України Михайлу Згурівському. Професор Михайло Згурівський отримав цю відзнаку під час наукової конференції "Наше століття. Наука заради миру", на якій він виступив з доповіддю на тему "Загальна картина світової економіки та суспільства". У 2018 році КПІ ім. Ігоря Сікорського відзначає своє 120-річчя. Його історія тісно пов'язана з розвитком світової науки. Нині він є одним з найвідоміших українських університетів. Його наукові та освітні досягнення визнано в усьому світі. Серед його випускників багато видатних учених, у тому числі В.Свентославський, А.Люлька, Б.Паттон та інші.

Медаль ректору

В останні роки співпраця між Київською політехнікою та Познанським технологічним університетом активно розвивається. Одним із головних ініціаторів цього є Михайло Згурівський. Тож останнім часом було підписано декілька угод щодо організації спільних досліджень та започаткування програм подвійного диплома. В останньому семестрі в Познанському технологічному університеті навчалася група студентів з України, а студенти з Познані їздили до Києва для проходження курсу, організованого компанією Boeing. Тісно співпрацюють і співробітники обох університетів. Одним із важливих спільних проєктів, який реалізують Познанський технологічний університет та Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, є створення наносупутника PolyTAN 3.

Інф. Познанського технологічного університету

День Японії в КПІ: бонсай, кенджюцу, ошібана, шякухачі, "Дякую" та інше

День 7 вересня в КПІ ім. Ігоря Сікорського було забарвлено в національні кольори Японії. Майже повсюдно панував дух Країни Вранішнього Сонця. У Науково-технічній бібліотеці, в Державному політехнічному музеї та на площі Знань університету з ранку і до самого вечора проводилися заходи, присвячені найрізноманітнішим явищам традиційної і сучасної японської культури.

Так в університеті проходив День Японії. Уперше такий день було організовано в 2014 році у Львові, потім він пройшов в Одесі, згодом – у Дніпрі та Вінниці. І от нарешті черга дійшла й до Києва. Щоправда, було б деякою нещирістю стверджувати, що всі ці п'ять років Київська політехніка була взагалі позбавлена можливості знайомитися, вивчати і долучатися до науково-інтелектуальних і мистецьких надбань далекосхідної країни. Адже саме тут міститься напевно головний в Україні центр розвитку культурного співробітництва та взаєморозуміння між народами України та



Перший проректор КПІ ім. Ігоря Сікорського Ю.Якимейко і Посол Японії в Україні С. Сумі відкривають День Японії

Японії. Він так і зветься – Українсько-Японський центр КПІ ім. Ігоря Сікорського і впродовж усіх років існування проводить величезну роботу, а також у тісній співпраці з Посольством Японії в Україні організує безліч різноманітних заходів, спрямованих на поглиблення відносин між нашими країнами.

Українсько-Японський центр КПІ був і залишається й головним організатором Днів Японії в Україні.

"Відносини між Японією та Україною дуже гарні, між нашими країнами є тісний зв'язок. Я думаю, що зв'язки у політичній,

Закінчення на 8-й стор. ➔

СЬОГОДНІ В НОМЕРІ:

1 День Японії в КПІ

2 Гранти Президента України для молодих учених

На засіданні Вченої ради

3 Конференція з енергозбереження

4,5 Українсько-Японський центр інформує

4 Досвід профорієнтації

5 Запрошує Колізей

6 Літня школа "Мехатроніка"

7 До 150-річчя Г.Ф.Вороного

Міжнародна конференція з енергозбереження

Міжнародна науково-практична конференція "Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності" відбулася 7–8 червня 2018 р. у КПІ ім. Ігоря Сікорського. Її ініціаторами й організаторами виступили Інститут енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського (кафедра охорони праці, промислової та цивільної безпеки і кафедра електропостачання), Київський національний університет технологій та дизайну й громадська організація – Міжнародна академія безпеки життєдіяльності. У роботі конференції взяли участь 107 науковців з 12 країн – Бразилії, Азербайджану, Болгарії, Казахстану, Кенії, М'янми, Норвегії, Польщі, Японії, США та ін. Враховуючи різнопланові інтереси доповідачів і напрями наукових досліджень, у збірник доповідей включено 59 статей за чотирма розділами: актуальні питання отримання та збереження енергії; безпека людини в сучасних енергоємних та енергобезпечних умовах; новітні технології та устаткування для енергобезпечних робіт; охорона праці як запорука безпеки сучасних енергозберігаючих технологій.

Академік НАН України, д.т.н. Г.Г.Півняк (Національний гірничий університет, м. Дніпро), д.т.н. І.В.Жежеленко (Приазовський технічний університет, м. Маріуполь), д.т.н. Г.Г.Трофімов (Алматинський університет енергетики та зв'язку, Казахстан), к.т.н. Ю.А.Папаїка (Національний гірничий університет, м. Дніпро) внесли на обговорення актуальний для розвитку промисловості України напрям досліджень: вплив якості електроенергії на надійність електропостачання. Запропоновано комплексний підхід

до вирішення цієї проблеми через впровадження нової нормативної бази.

Виступ представників Інституту технічної теплофізики НАН України (м. Київ) чл.-кор. НАН України, д.т.н. Б.І.Басока і к.т.н. М.П.Новицької було присвячено підвищенню ефективності використання теплової енергії в сучасному містобудуванні. Науковці з Азербайджанського ТУ д.т.н. Е.Г.Ісмібейлі і к.т.н.



Зліва направо: к.т.н. М.Д.Громов, д.т.н., проф. С.П.Денисюк і д.т.н., проф. Л.Д.Третьякова

І.Дж.Ісламов розробили нові узагальнюючі математичні моделі електромагнітних полів, які дозволяють суттєво зменшити трудовитрати та оперативню контролювати процес моделювання.

Науковці Gusev M. (Japan), Odhiambo C.O. (Kenya), Hasegawa A. (Japan), Thu M.M. (Myanmar), к.т.н. А.Гусев (КПІ ім. Ігоря Сікорського) зробили доповідь з питань впливу енергетичних процесів на зміни клімату в африканських та азійських країнах. William Felipe Silva Maia (Brazil) та Peter Ekel (Brazil) виклали метод оцінювання ризиків, вплив яких призводить до нещасних випадків. От-

римані результати дозволили ранжувати небезпечні та шкідливі виробничі чинники. Порівняльний аналіз рівня соціального страхування в Україні і Польщі було наведено в доповіді доцента Університету технологій та дизайну (м. Київ), к.т.н. Ю.В.Клапцова та магістра О.А.Ісаєва (Poland).

Професор С.П.Денисюк і аспірант Д.С.Горенко (КПІ ім. Ігоря Сікорського) та к.т.н. І.П.Радиш (Ужгородський НУ) надали оцінку впливу електромагнітних полів медичного устаткування на самопочуття людини. Доктор технічних наук К.К.Ткачук та магістр І.О.Ополінський (КПІ ім. Ігоря Сікорського) в своїй доповіді розглянули результати експериментальних досліджень, завдяки яким отримано достовірні значення продуктивності утворення біогазу. Доповідь к.т.н. Ю.І.Шульги (КПІ ім. Ігоря Сікорського) була присвячена вирішенню проблем енергоресурсозбереження для покращення безпеки життєдіяльності. З доповідями від нашого університету також виступили к.т.н. С.Ф.Каштанов, к.т.н. О.І.Полукарів та ін.

Доцент В.В.Зацарний разом з д.т.н. Л.Д.Третьяковою (кафедра охорони праці, промислової та цивільної безпеки) до 120-річчя КПІ підготували цікаву доповідь про першого ректора В.Л.Кирличова та його роль у розвитку охорони праці. А під час перерви вони провели для учасників екскурсію територією університету.

Плідній роботі сприяв чудовий зал зі зручним обладнанням і можливість вільного спілкування між учасниками і організаторами.

*Л.Ф.Третьякова, д.т.н., професор;
Н.Ф.Качицька, асистент ІЕЕ*

Рецепт фахового успіху – рішучість помножена на кмітливість

Саме за такою формою виникла співпраця Анастасії Косминої, Івана Окринця та Софії Косминої – студентів шостого, п'ятого та третього курсів спеціалізації мехатронного спрямування ММІ. Практичне завдання, що стояло перед ними, на перший погляд нескладне – автоматизувати дві дії мобільної радіолокаційної установки: перехід з похідного в робоче положення та горизонтування платформи установки. Попри велику кількість подібних технічних рішень, Іван Окринець, який, до речі, працює у фірмі, що розробляє подібну техніку, з самого початку вирішив неупереджено підійти до цього завдання. Як фахівець з гідроприводу він розумів, що вказані в завданні вага установки (5 тонн) та три швидкості для її розвантаження і завантаження є найбільш прийнятними для гідроавтоматики. З іншого боку, як фахівець з гідроавтоматики він знав вартість обладнання та енергоємність і вартість його експлуатації – потужність насосного агрегату та постійне енергоспоживання. Друга обставина додала проблем до обладнання мобільної машини, яка перевозить і енергоносії, і потрібну в польових умовах техніку.

На цій ноті і відбулася зустріч рішучості з кмітливостю. Усі троє зустрілися під час підготовки до молодіжної наукової конференції та підготовки лабораторій мехатроніки до літньої школи "Мехатроніка в машинобудуванні-2018". Саме тоді дві сестри, Анастасія і Софія Космині, допомогли одна одній завершити магістерську дисертацію старшої – Анастасії, та обрати напрям для проекту бакалавра молодшої – Софії.

Проблема, яку досліджувала Анастасія, мала відому аналогію в системі кровообігу: серце і су-

дини – разом вони надають життя і зміст всім діям і рухам кожного органу. Так само і в мехатроніці – енергозабезпечення від елементів живлення до кожної ланки, а через "судини" гідраліки – до виконавчих гідралічних пристроїв. Але судини системи кровообігу не тільки транспортують життєву рідину, але й задають їй напрям, тиск, допомагають тємі. Чому в гідроприводі не зробити



те саме – передати частину функцій енергетики від насоса до гідралічних каналів? У дослідженнях Анастасії в гідралічні канали ввели додаткові клапани, примусили їх працювати в унісон і забезпечувати необхідний тиск і "пульс" гідроприводу – надсилати хвилю за хвилею рідину відповідного тиску до цїлі. Виявилось, що така робота "гідралічних судин" при невеликих швидкостях і точних рухах суттєво зменшує необхідну потужність насосного агрегату.

У цей час Іван розробляв систему гідроавтоматики, яка в одному випадку працює швидко, а в

іншому – повільно й обережно. На цьому етапі відбулося множення рішучості автора практичного завдання на кмітливість дослідника: швидкі рухи забезпечує звичайна гідраліка і насосний агрегат, а точне переміщення забезпечують пружні властивості гідралічних каналів і рідини та накопичена в акумуляторі рідина під тиском. Тож у режимі точних і невеликих переміщень буде використано надлишок енергії, накопичений в інших режимах, а енергоспоживання взагалі відсутнє.

Півроку роботи, чотири доповіді на конференціях – і технічне рішення майже готове. Але попереду дві магістерські роботи – дослідження точності, енергоємності, надійності, імітаційне моделювання режимів у польових умовах. Привабністю цієї роботи є наявність реальної системи-прототипу (див. фото), на якій вже заплановано встановлення і випробування нової мехатронної системи та відповідно до якої розробляють конструкторську документацію "гідралічних судин". Та реальна система вимагає реальних рішень у реальних умовах. Необхідно передбачити безліч особливостей: зміну температури рідини від +60 до –30°C, порив вітру змінного напрямку до 20 м/с, нерівності ґрунту та його різну податливість, неухваленість обладнання від динамічних навантажень та багато інших, які відрізняють фахівця від гарного студента.

Так, волею випадку, навесні 2018 року троє студентів-учасників олімпіади "Мехатроніка в машинобудуванні" доторкнулися до "дорослої роботи" та перейшли в категорію конструкторів-дослідників новітньої техніки. До зустрічі на випробуваннях.

О.П.Губарев, професор кафедри ПММ

Apêndice E

Questionário de avaliação da subestação PS1

Questionário de Avaliação - Subestações - Consequência		
Qual o impacto ambiental mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J1	Impacto ambiental	Médio
Qual o impacto reputacional mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J2	Impacto reputacional	Baixo
Qual o impacto produtivo mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J3	Impacto produtivo	Alto
Qual o impacto financeiro mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J4	Impacto financeiro	Médio

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P1		
Existe redundância para o equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Redundante ativo ou N/A
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Redundante inativo
5	Cabeamento e Barramentos	Redundante inativo
6	Sistema de proteção, medição e controle	Redundante ativo ou N/A
7	Transformadores e sistemas associados	Redundante inativo
8	Painéis	Não possui
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Redundante ativo ou N/A
10	Sistema de aterramento	Redundante ativo ou N/A
11	Sistema de proteção contra incêndio	Redundante ativo ou N/A
12	Infra-civil e aspectos gerais	Redundante ativo ou N/A
Qual é a característica tecnológica do equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Atual
2	Sistema de seccionamento	Ultrapassada/ Inexistente
3	Sistema de manobra	Ultrapassada/ Inexistente
4	Sistemas de energia auxiliares	Atual
5	Cabeamento e Barramentos	Ultrapassada/ Inexistente
6	Sistema de proteção, medição e controle	Atual
7	Transformadores e sistemas associados	Atual
8	Painéis	Atual
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Atual
10	Sistema de aterramento	Atual
11	Sistema de proteção contra incêndio	Ultrapassada/ Inexistente
12	Infra-civil e aspectos gerais	Atual

Qual a disponibilidade de assistência técnica do equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Regional
2	Sistema de seccionamento	Regional
3	Sistema de manobra	Regional
4	Sistemas de energia auxiliares	Regional
5	Cabeamento e Barramentos	Regional
6	Sistema de proteção, medição e controle	Regional
7	Transformadores e sistemas associados	Regional
8	Painéis	Regional
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Regional
10	Sistema de aterramento	Regional
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Regional
Qual a disponibilidade de equipamento reserva ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Existente ou N/A
2	Sistema de seccionamento	Depende de aquisição
3	Sistema de manobra	Depende de aquisição
4	Sistemas de energia auxiliares	Existente ou N/A
5	Cabeamento e Barramentos	Depende de aquisição
6	Sistema de proteção, medição e controle	Depende de aquisição
7	Transformadores e sistemas associados	Existente ou N/A
8	Painéis	Depende de aquisição
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Existente ou N/A
10	Sistema de aterramento	Existente ou N/A
11	Sistema de proteção contra incêndio	Existente ou N/A
12	Infra-civil e aspectos gerais	Existente ou N/A

Qual a complexidade de realizar a reposição de peças?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Imediata
2	Sistema de seccionamento	Aquisição
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Aquisição
5	Cabeamento e Barramentos	Aquisição
6	Sistema de proteção, medição e controle	Aquisição
7	Transformadores e sistemas associados	Aquisição
8	Painéis	Aquisição
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Aquisição
10	Sistema de aterramento	Imediata
11	Sistema de proteção contra incêndio	Aquisição
12	Infra-civil e aspectos gerais	Imediata

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P2		
Para a intervenção do equipamento ou componente da instalação existe um procedimento de manutenção específico?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Não possui
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Não possui
5	Cabeamento e Barramentos	Não possui
6	Sistema de proteção, medição e controle	Não possui
7	Transformadores e sistemas associados	Integrado a um genérico
8	Painéis	Integrado a um genérico
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Não possui
10	Sistema de aterramento	Não possui
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não possui
Para a intervenção no equipamento ou componente da instalação existe um procedimento de operação específico?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Não possui
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Não possui
5	Cabeamento e Barramentos	Não possui
6	Sistema de proteção, medição e controle	Não possui
7	Transformadores e sistemas associados	Não possui
8	Painéis	Não possui
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Não possui
10	Sistema de aterramento	Não possui
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não possui

Qual o tipo de operação é realizado no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Remota ou N/A
2	Sistema de seccionamento	Local/ Uso de EPIs
3	Sistema de manobra	Local/ Uso de EPIs
4	Sistemas de energia auxiliares	Local/ Uso de EPIs
5	Cabeamento e Barramentos	Remota ou N/A
6	Sistema de proteção, medição e controle	Parcialmente remota/ EPIs
7	Transformadores e sistemas associados	Parcialmente remota/ EPIs
8	Painéis	Parcialmente remota/ EPIs
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Parcialmente remota/ EPIs
10	Sistema de aterramento	Remota ou N/A
11	Sistema de proteção contra incêndio	Remota ou N/A
12	Infra-civil e aspectos gerais	Remota ou N/A

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P3		
Qual o tipo de mão de obra necessária para a realização das tarefas mais complexas no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	MO básica
2	Sistema de seccionamento	MO especializada
3	Sistema de manobra	MO especializada
4	Sistemas de energia auxiliares	MO especializada
5	Cabeamento e Barramentos	MO especializada
6	Sistema de proteção, medição e controle	MO especializada
7	Transformadores e sistemas associados	MO especializada
8	Painéis	MO especializada
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	MO especializada
10	Sistema de aterramento	MO básica
11	Sistema de proteção contra incêndio	MO especializada
12	Infra-civil e aspectos gerais	MO básica
Qual o tempo médio de exposição diária do profissional de manutenção durante as intervenções?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	x<2
2	Sistema de seccionamento	x<2
3	Sistema de manobra	x<2
4	Sistemas de energia auxiliares	x<2
5	Cabeamento e Barramentos	x<2
6	Sistema de proteção, medição e controle	2<x<4
7	Transformadores e sistemas associados	2<x<4
8	Painéis	2<x<4
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	x<2
10	Sistema de aterramento	x<2
11	Sistema de proteção contra incêndio	x<2
12	Infra-civil e aspectos gerais	x<2

Qual a periodicidade de intervenção no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Anual
2	Sistema de seccionamento	Semestral
3	Sistema de manobra	Semanal
4	Sistemas de energia auxiliares	Mensal
5	Cabeamento e Barramentos	Anual
6	Sistema de proteção, medição e controle	Diária
7	Transformadores e sistemas associados	Mensal
8	Painéis	Diária
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Semestral
10	Sistema de aterramento	Anual
11	Sistema de proteção contra incêndio	Anual
12	Infra-civil e aspectos gerais	Anual

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P4

Existe histórico de incidentes ou falhas operacionais no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	>anual
2	Sistema de seccionamento	>anual
3	Sistema de manobra	Semestral
4	Sistemas de energia auxiliares	>anual
5	Cabeamento e Barramentos	>anual
6	Sistema de proteção, medição e controle	>anual
7	Transformadores e sistemas associados	>anual
8	Painéis	>anual
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Mensal
10	Sistema de aterramento	Semestral
11	Sistema de proteção contra incêndio	>anual
12	Infra-civil e aspectos gerais	>anual
Qual o tipo de manutenção é realizada no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Corretiva
2	Sistema de seccionamento	Preventiva e Preditiva
3	Sistema de manobra	Preventiva e Preditiva
4	Sistemas de energia auxiliares	Preventiva e Preditiva
5	Cabeamento e Barramentos	Corretiva
6	Sistema de proteção, medição e controle	Preventiva e Preditiva
7	Transformadores e sistemas associados	Preventiva e Preditiva
8	Painéis	Preventiva e Preditiva
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Preventiva e Preditiva
10	Sistema de aterramento	Corretiva
11	Sistema de proteção contra incêndio	Corretiva
12	Infra-civil e aspectos gerais	Corretiva

Existe alguma condição crítica operacional identificada em algum equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Não possui
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Não possui
5	Cabeamento e Barramentos	Não possui
6	Sistema de proteção, medição e controle	Não possui
7	Transformadores e sistemas associados	Não possui
8	Painéis	Não possui
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Possui uma condição
10	Sistema de aterramento	Não possui
11	Sistema de proteção contra incêndio	Possui uma condição
12	Infra-civil e aspectos gerais	Possui uma condição
Existe adequação e aderência ao plano de manutenção (Back log)?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Não aderente
2	Sistema de seccionamento	Parcialmente aderente
3	Sistema de manobra	Não aderente
4	Sistemas de energia auxiliares	Parcialmente aderente
5	Cabeamento e Barramentos	Não aderente
6	Sistema de proteção, medição e controle	Parcialmente aderente
7	Transformadores e sistemas associados	Parcialmente aderente
8	Painéis	Parcialmente aderente
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Parcialmente aderente
10	Sistema de aterramento	Não aderente
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não aderente
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não aderente

Apêndice F

Questionário de avaliação da subestação PS2

Questionário de Avaliação - Subestações - Consequência		
Qual o impacto ambiental mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J1	Impacto ambiental	Médio
Qual o impacto reputacional mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J2	Impacto reputacional	Baixo
Qual o impacto produtivo mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J3	Impacto produtivo	Alto
Qual o impacto financeiro mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J4	Impacto financeiro	Alto

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P1		
Existe redundância para o equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Redundante ativo ou N/A
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Redundante ativo ou N/A
4	Sistemas de energia auxiliares	Redundante ativo ou N/A
5	Cabeamento e Barramentos	Redundante inativo
6	Sistema de proteção, medição e controle	Não possui
7	Transformadores e sistemas associados	Redundante inativo
8	Painéis	Não possui
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Redundante inativo
10	Sistema de aterramento	Redundante ativo ou N/A
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Redundante ativo ou N/A
Qual é a característica tecnológica do equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Atual
2	Sistema de seccionamento	Atual
3	Sistema de manobra	Estado da técnica
4	Sistemas de energia auxiliares	Atual
5	Cabeamento e Barramentos	Atual
6	Sistema de proteção, medição e controle	Ultrapassada/ Inexistente
7	Transformadores e sistemas associados	Atual
8	Painéis	Ultrapassada/ Inexistente
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Ultrapassada/ Inexistente
10	Sistema de aterramento	Atual
11	Sistema de proteção contra incêndio	Atual
12	Infra-civil e aspectos gerais	Atual

Qual a disponibilidade de assistência técnica do equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Regional
2	Sistema de seccionamento	Regional
3	Sistema de manobra	Regional
4	Sistemas de energia auxiliares	Regional
5	Cabeamento e Barramentos	Regional
6	Sistema de proteção, medição e controle	Regional
7	Transformadores e sistemas associados	Não possui
8	Painéis	Nacional
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Regional
10	Sistema de aterramento	Regional
11	Sistema de proteção contra incêndio	Regional
12	Infra-civil e aspectos gerais	Regional
Qual a disponibilidade de equipamento reserva ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Existente ou N/A
2	Sistema de seccionamento	Existente ou N/A
3	Sistema de manobra	Existente ou N/A
4	Sistemas de energia auxiliares	Depende de aquisição
5	Cabeamento e Barramentos	Existente ou N/A
6	Sistema de proteção, medição e controle	Existente ou N/A
7	Transformadores e sistemas associados	Depende de aquisição
8	Painéis	Depende de aquisição
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Depende de aquisição
10	Sistema de aterramento	Existente ou N/A
11	Sistema de proteção contra incêndio	Depende de aquisição
12	Infra-civil e aspectos gerais	Existente ou N/A

Qual a complexidade de realizar a reposição de peças?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Imediata
2	Sistema de seccionamento	Aquisição
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Aquisição
5	Cabeamento e Barramentos	Imediata
6	Sistema de proteção, medição e controle	Imediata
7	Transformadores e sistemas associados	Aquisição
8	Painéis	Aquisição
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Aquisição
10	Sistema de aterramento	Imediata
11	Sistema de proteção contra incêndio	Aquisição
12	Infra-civil e aspectos gerais	Imediata

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P2		
Para a intervenção do equipamento ou componente da instalação existe um procedimento de manutenção específico?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Específico
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Específico
4	Sistemas de energia auxiliares	Não possui
5	Cabeamento e Barramentos	Não possui
6	Sistema de proteção, medição e controle	Não possui
7	Transformadores e sistemas associados	Não possui
8	Painéis	Não possui
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Não possui
10	Sistema de aterramento	Não possui
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não possui
Para a intervenção no equipamento ou componente da instalação existe um procedimento de operação específico?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Específico
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Não possui
5	Cabeamento e Barramentos	Não possui
6	Sistema de proteção, medição e controle	Não possui
7	Transformadores e sistemas associados	Não possui
8	Painéis	Não possui
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Não possui
10	Sistema de aterramento	Não possui
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não possui

Qual o tipo de operação é realizado no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Remota ou N/A
2	Sistema de seccionamento	Remota ou N/A
3	Sistema de manobra	Remota ou N/A
4	Sistemas de energia auxiliares	Local/ Uso de EPIs
5	Cabeamento e Barramentos	Remota ou N/A
6	Sistema de proteção, medição e controle	Remota ou N/A
7	Transformadores e sistemas associados	Remota ou N/A
8	Painéis	Local/ Uso de EPIs
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Local/ Uso de EPIs
10	Sistema de aterramento	Remota ou N/A
11	Sistema de proteção contra incêndio	Remota ou N/A
12	Infra-civil e aspectos gerais	Remota ou N/A

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P3

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P3		
Qual o tipo de mão de obra necessária para a realização das tarefas mais complexas no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	MO básica
2	Sistema de seccionamento	MO especializada
3	Sistema de manobra	MO especializada
4	Sistemas de energia auxiliares	MO especializada
5	Cabeamento e Barramentos	MO especializada
6	Sistema de proteção, medição e controle	MO especializada
7	Transformadores e sistemas associados	MO especializada
8	Painéis	MO especializada
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	MO especializada
10	Sistema de aterramento	MO básica
11	Sistema de proteção contra incêndio	MO especializada
12	Infra-civil e aspectos gerais	MO básica
Qual o tempo médio de exposição diária do profissional de manutenção durante as intervenções?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	$x < 2$
2	Sistema de seccionamento	$2 < x < 4$
3	Sistema de manobra	$x < 2$
4	Sistemas de energia auxiliares	$x < 2$
5	Cabeamento e Barramentos	$x < 2$
6	Sistema de proteção, medição e controle	$2 < x < 4$
7	Transformadores e sistemas associados	$2 < x < 4$
8	Painéis	$2 < x < 4$
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	$x < 2$
10	Sistema de aterramento	$x < 2$
11	Sistema de proteção contra incêndio	$x < 2$
12	Infra-civil e aspectos gerais	$x < 2$

Qual a periodicidade de intervenção no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Semestral
2	Sistema de seccionamento	Semestral
3	Sistema de manobra	Anual
4	Sistemas de energia auxiliares	Mensal
5	Cabeamento e Barramentos	Anual
6	Sistema de proteção, medição e controle	Mensal
7	Transformadores e sistemas associados	Mensal
8	Painéis	Semanal
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Mensal
10	Sistema de aterramento	Semestral
11	Sistema de proteção contra incêndio	Anual
12	Infra-civil e aspectos gerais	Anual

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P4

Existe histórico de incidentes ou falhas operacionais no equipamento ou componente da instalação?

Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	>anual
2	Sistema de seccionamento	Semestral
3	Sistema de manobra	>anual
4	Sistemas de energia auxiliares	>anual
5	Cabeamento e Barramentos	Semestral
6	Sistema de proteção, medição e controle	>anual
7	Transformadores e sistemas associados	>anual
8	Painéis	>anual
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	>anual
10	Sistema de aterramento	>anual
11	Sistema de proteção contra incêndio	Mensal
12	Infra-civil e aspectos gerais	>anual

Qual o tipo de manutenção é realizada no equipamento ou componente da instalação?

Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Preventiva e Preditiva
2	Sistema de seccionamento	Preventiva e Preditiva
3	Sistema de manobra	Estado da técnica
4	Sistemas de energia auxiliares	Preventiva e Preditiva
5	Cabeamento e Barramentos	Corretiva
6	Sistema de proteção, medição e controle	Preventiva e Preditiva
7	Transformadores e sistemas associados	Preventiva e Preditiva
8	Painéis	Corretiva
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Preventiva e Preditiva
10	Sistema de aterramento	Corretiva
11	Sistema de proteção contra incêndio	Corretiva
12	Infra-civil e aspectos gerais	Corretiva

Existe alguma condição crítica operacional identificada em algum equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Uma condição
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Uma condição
5	Cabeamento e Barramentos	Não possui
6	Sistema de proteção, medição e controle	Não possui
7	Transformadores e sistemas associados	Não possui
8	Painéis	Não possui
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Não possui
10	Sistema de aterramento	Não possui
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não possui
Existe adequação e aderência ao plano de manutenção (Back log)?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Parcialmente aderente
2	Sistema de seccionamento	Parcialmente aderente
3	Sistema de manobra	Aderente
4	Sistemas de energia auxiliares	Parcialmente aderente
5	Cabeamento e Barramentos	Não aderente
6	Sistema de proteção, medição e controle	Parcialmente aderente
7	Transformadores e sistemas associados	Parcialmente aderente
8	Painéis	Não aderente
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Parcialmente aderente
10	Sistema de aterramento	Parcialmente aderente
11	Sistema de proteção contra incêndio	Parcialmente aderente
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não aderente

Apêndice G

Questionário de avaliação da subestação PS3

Questionário de Avaliação - Subestações - Consequência		
Qual o impacto ambiental mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J1	Impacto ambiental	Baixo
Qual o impacto reputacional mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J2	Impacto reputacional	Baixo
Qual o impacto produtivo mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J3	Impacto produtivo	Médio
Qual o impacto financeiro mediante a falha no fornecimento de energia elétrica pela subestação de energia?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
J4	Impacto financeiro	Médio

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P1		
Existe redundância para o equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Redundante ativo ou N/A
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Redundante inativo
5	Cabeamento e Barramentos	Redundante inativo
6	Sistema de proteção, medição e controle	Redundante ativo ou N/A
7	Transformadores e sistemas associados	Redundante inativo
8	Painéis	Não possui
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Redundante ativo ou N/A
10	Sistema de aterramento	Redundante ativo ou N/A
11	Sistema de proteção contra incêndio	Redundante ativo ou N/A
12	Infra-civil e aspectos gerais	Redundante ativo ou N/A
Qual é a característica tecnológica do equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Atual
2	Sistema de seccionamento	Ultrapassada/ Inexistente
3	Sistema de manobra	Ultrapassada/ Inexistente
4	Sistemas de energia auxiliares	Atual
5	Cabeamento e Barramentos	Ultrapassada/ Inexistente
6	Sistema de proteção, medição e controle	Atual
7	Transformadores e sistemas associados	Atual
8	Painéis	Atual
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Atual
10	Sistema de aterramento	Atual
11	Sistema de proteção contra incêndio	Ultrapassada/ Inexistente
12	Infra-civil e aspectos gerais	Atual

Qual a disponibilidade de assistência técnica do equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Regional
2	Sistema de seccionamento	Regional
3	Sistema de manobra	Regional
4	Sistemas de energia auxiliares	Regional
5	Cabeamento e Barramentos	Regional
6	Sistema de proteção, medição e controle	Regional
7	Transformadores e sistemas associados	Regional
8	Painéis	Regional
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Regional
10	Sistema de aterramento	Regional
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Regional
Qual a disponibilidade de equipamento reserva ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Existente ou N/A
2	Sistema de seccionamento	Depende de aquisição
3	Sistema de manobra	Depende de aquisição
4	Sistemas de energia auxiliares	Existente ou N/A
5	Cabeamento e Barramentos	Depende de aquisição
6	Sistema de proteção, medição e controle	Depende de aquisição
7	Transformadores e sistemas associados	Existente ou N/A
8	Painéis	Depende de aquisição
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Existente ou N/A
10	Sistema de aterramento	Existente ou N/A
11	Sistema de proteção contra incêndio	Existente ou N/A
12	Infra-civil e aspectos gerais	Existente ou N/A

Qual a complexidade de realizar a reposição de peças?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Imediata
2	Sistema de seccionamento	Aquisição
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Aquisição
5	Cabeamento e Barramentos	Aquisição
6	Sistema de proteção, medição e controle	Aquisição
7	Transformadores e sistemas associados	Aquisição
8	Painéis	Aquisição
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Aquisição
10	Sistema de aterramento	Imediata
11	Sistema de proteção contra incêndio	Aquisição
12	Infra-civil e aspectos gerais	Imediata

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P2		
Para a intervenção do equipamento ou componente da instalação existe um procedimento de manutenção específico?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Não possui
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Não possui
5	Cabeamento e Barramentos	Não possui
6	Sistema de proteção, medição e controle	Não possui
7	Transformadores e sistemas associados	Integrado a um genérico
8	Painéis	Integrado a um genérico
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Não possui
10	Sistema de aterramento	Não possui
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não possui
Para a intervenção no equipamento ou componente da instalação existe um procedimento de operação específico?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Não possui
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Não possui
4	Sistemas de energia auxiliares	Não possui
5	Cabeamento e Barramentos	Não possui
6	Sistema de proteção, medição e controle	Não possui
7	Transformadores e sistemas associados	Não possui
8	Painéis	Não possui
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Não possui
10	Sistema de aterramento	Não possui
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não possui

Qual o tipo de operação é realizado no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Remota ou N/A
2	Sistema de seccionamento	Local/ Uso de EPIs
3	Sistema de manobra	Local/ Uso de EPIs
4	Sistemas de energia auxiliares	Local/ Uso de EPIs
5	Cabeamento e Barramentos	Remota ou N/A
6	Sistema de proteção, medição e controle	Parcialmente remota/ EPIs
7	Transformadores e sistemas associados	Parcialmente remota/ EPIs
8	Painéis	Parcialmente remota/ EPIs
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Parcialmente remota/ EPIs
10	Sistema de aterramento	Remota ou N/A
11	Sistema de proteção contra incêndio	Remota ou N/A
12	Infra-civil e aspectos gerais	Remota ou N/A

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P3		
Qual o tipo de mão de obra necessária para a realização das tarefas mais complexas no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	MO básica
2	Sistema de seccionamento	MO especializada
3	Sistema de manobra	MO especializada
4	Sistemas de energia auxiliares	MO especializada
5	Cabeamento e Barramentos	MO especializada
6	Sistema de proteção, medição e controle	MO especializada
7	Transformadores e sistemas associados	MO especializada
8	Painéis	MO especializada
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	MO especializada
10	Sistema de aterramento	MO básica
11	Sistema de proteção contra incêndio	MO especializada
12	Infra-civil e aspectos gerais	MO básica
Qual o tempo médio de exposição diária do profissional de manutenção durante as intervenções?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	x<2
2	Sistema de seccionamento	x<2
3	Sistema de manobra	x<2
4	Sistemas de energia auxiliares	x<2
5	Cabeamento e Barramentos	x<2
6	Sistema de proteção, medição e controle	2<x<4
7	Transformadores e sistemas associados	2<x<4
8	Painéis	2<x<4
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	x<2
10	Sistema de aterramento	x<2
11	Sistema de proteção contra incêndio	x<2
12	Infra-civil e aspectos gerais	x<2

Qual a periodicidade de intervenção no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Anual
2	Sistema de seccionamento	Semestral
3	Sistema de manobra	Semanal
4	Sistemas de energia auxiliares	Mensal
5	Cabeamento e Barramentos	Anual
6	Sistema de proteção, medição e controle	Diária
7	Transformadores e sistemas associados	Mensal
8	Painéis	Diária
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Semestral
10	Sistema de aterramento	Anual
11	Sistema de proteção contra incêndio	Anual
12	Infra-civil e aspectos gerais	Anual

Questionário de Avaliação - Subestações - Probabilidade P4		
Existe histórico de incidentes ou falhas operacionais no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	>anual
2	Sistema de seccionamento	>anual
3	Sistema de manobra	Semestral
4	Sistemas de energia auxiliares	>anual
5	Cabeamento e Barramentos	>anual
6	Sistema de proteção, medição e controle	>anual
7	Transformadores e sistemas associados	>anual
8	Painéis	>anual
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Mensal
10	Sistema de aterramento	Semestral
11	Sistema de proteção contra incêndio	>anual
12	Infra-civil e aspectos gerais	>anual
Qual o tipo de manutenção é realizada no equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Corretiva
2	Sistema de seccionamento	Preventiva e Preditiva
3	Sistema de manobra	Preventiva e Preditiva
4	Sistemas de energia auxiliares	Preventiva e Preditiva
5	Cabeamento e Barramentos	Corretiva
6	Sistema de proteção, medição e controle	Preventiva e Preditiva
7	Transformadores e sistemas associados	Preventiva e Preditiva
8	Painéis	Preventiva e Preditiva
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Preventiva e Preditiva
10	Sistema de aterramento	Corretiva
11	Sistema de proteção contra incêndio	Corretiva
12	Infra-civil e aspectos gerais	Corretiva

Existe alguma condição crítica operacional identificada em algum equipamento ou componente da instalação?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Possui uma condição
2	Sistema de seccionamento	Não possui
3	Sistema de manobra	Multiplas condições
4	Sistemas de energia auxiliares	Possui uma condição
5	Cabeamento e Barramentos	Não possui
6	Sistema de proteção, medição e controle	Possui uma condição
7	Transformadores e sistemas associados	Possui uma condição
8	Painéis	Multiplas condições
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Não possui
10	Sistema de aterramento	Não possui
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não possui
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não possui
Existe adequação e aderência ao plano de manutenção (Back log)?		
Item	Grupo de equipamentos	Avaliação
1	Sistema de proteção de descarga atmosférica	Não aderente
2	Sistema de seccionamento	Parcialmente aderente
3	Sistema de manobra	Não aderente
4	Sistemas de energia auxiliares	Parcialmente aderente
5	Cabeamento e Barramentos	Não aderente
6	Sistema de proteção, medição e controle	Parcialmente aderente
7	Transformadores e sistemas associados	Parcialmente aderente
8	Painéis	Parcialmente aderente
9	Sistemas de reativos (BC e reatores)	Parcialmente aderente
10	Sistema de aterramento	Não aderente
11	Sistema de proteção contra incêndio	Não aderente
12	Infra-civil e aspectos gerais	Não aderente