AVALIAÇÃO DE RISCOS DE SUBESTAÇÕES PARA A PREVENÇÃO DE ACIDENTES: ANÁLISE DE FATORES CONTRIBUINTES

Willian Felipe Silva Maia
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas
Av. Dom José Gaspar, 500 - Coração Eucarístico - Belo Horizonte - MG - Brasil
willianmaia1@yahoo.com.br

Petr Iakovlevitch Ekel
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas
Av. Dom José Gaspar, 500 - Coração Eucarístico - Belo Horizonte - MG - Brasil
pekel@superig.com.br

Pyramo Pires da Costa Júnior
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas
Av. Dom José Gaspar, 500 - Coração Eucarístico - Belo Horizonte - MG - Brasil
pyramo@pucminas.br

RESUMO

A eletricidade é um tipo de energia que produz riscos e seu uso indevido pode resultar em danos à saúde dos trabalhadores, bem como em perdas produtivas. O presente artigo propõe um método de avaliação para identificar a relevância dos fatores contribuintes relacionados à ocorrência de acidentes na operação e manutenção de subestações de energia. Este método está associado à análise de modos de falha pré-selecionados com a aplicação de uma versão *fuzzy* da Analytic Hierarchy Process, para estabelecer pesos dos critérios considerados e dos especialistas envolvidos no processo de avaliação com base em técnicas de tomada de decisão em grupo. Essas técnicas são aplicadas para determinar o nível de consenso entre os especialistas controlado por procedimentos de lógica *fuzzy*. Os resultados deste artigo permitem identificar quais fatores que têm um maior nível de contribuição em acidentes em subestações de energia.

PALAVRAS CHAVE. Subestações de energia. Avaliação de Risco. Decisão em grupo.

Tópicos (ADM - Apoio à Decisão Multicritério, IND - PO na Indústria, OA - Outras aplicações em PO)

ABSTRACT

Electricity is a type of energy that produces risks and its misuse may result in damage to the health of workers as well as to production losses. The present paper proposes an evaluation method to identify the relevance of contributing factors related to the occurrence of accidents in operation and maintenance of power substations. This method is associated with analyzing preselected failure modes with applying a *fuzzy* version of the Analytic Hierarchy Process to establish weights of considered criteria and experts involved in the evaluation process on the basis group decision making techniques. These techniques are applied to determine the level of consensus among experts controlled by *fuzzy* logic procedures. The paper results permit one to identify factors which have a high level contribution to accidents in power substations.

KEYWORDS. Power substations. Risk assessment. Group decision.

Paper topics (ADM - Multicriteria Decision Support, IND - OR in Industry, OA - Other applications in OR)

1. Introdução

Identificar e realizar gestão dos riscos envolvidos no processo de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica tornou-se cada vez mais necessário por parte das empresas que atuam neste seguimento. A ocorrência de acidentes de origem elétrica normalmente provoca danos pessoais aos trabalhadores, incluindo lesões graves e fatalidades. Além de perdas produtivas, gastos com processos judiciais e com multas aplicadas por órgãos fiscalizadores que refletem negativamente na saúde financeira das empresas [Brenner 2013].

A complexidade em se realizar a avaliação de riscos tem sido o grande desafio para as empresas. A ausência de dados estatísticos e históricos obrigam os profissionais a adotarem métodos de tomada de decisão intuitivos e empíricos fazendo uso de julgamentos pessoais [Siqueira e Souza 2010].

A aplicação de técnicas de tomada de decisão multicritério em grupo permite que vários aspectos complexos e conflitantes sejam resolvidos ou, pelo menos, parcialmente superados. Decisões em grupo normalmente são divergentes, sendo necessário aplicar técnicas adequadas para obter uma solução satisfatória. Ou seja, aquela que for aceitável para todos os membros do grupo, devido à raridade de se encontrar uma solução unânime [Ekel e Parreiras 2008].

A aplicação de técnicas de análise de riscos pode ser de interesse para diversos órgãos e profissionais do setor elétrico: equipes técnicas de planejamento, manutenção e operação, segurança do trabalho, agências reguladoras e órgãos fiscalizadores [Ekel e Parreiras 2008].

A baixa frequência de ocorrências de acidentes de origem elétrica, se comparada aos demais tipos de riscos, pode gerar uma falsa percepção de que a gestão do perigo está sob controle. Devido a este fato, trabalhadores podem reduzir a atenção durante a realização de suas atividades e por consequência se acidentarem [Floyd 2014]. Somente nos Estados Unidos 3500 pessoas sofrem ferimentos e 250 morrem por ano devido a acidentes envolvendo eletricidade. Já no Brasil, no ano de 2010, morreram 308 pessoas devido a acidentes de origem elétrica, o que representa quase uma morte por dia [Coge 2010], [International 2012]. O custo total estimado de acidentes do trabalho por ano no setor elétrico brasileiro é em média 441,6 milhões de reais. No período de 2001 a 2010, estima-se um gasto de 4,416 bilhões de reais [Coge 2010].

O método de identificação dos fatores contribuintes mais relevantes proposto neste trabalho apresenta as seguintes características:

- Padronização dos registros e da avaliação;
- Utilização do conhecimento de profissionais experientes;
- Abordagem de fácil aplicação em nível de engenharia;
- Consideração, comparação e ponderação dos critérios a serem utilizados na determinação dos pesos de cada especialista: experiência prática, acadêmica, funcional e formação em segurança do trabalho;
- Elevação da precisão da ponderação por meio da integração das opiniões individuais dos especialistas.

O objetivo principal deste artigo é apresentar uma metodologia que permita identificar quais são os fatores contribuintes mais relevantes na ocorrência de acidentes pessoais em subestações de energia. As mais importantes funcionalidades desta metodologia são as seguintes:

- Identificar a relevância dos fatores contribuintes previamente definidos em função de uma problemática;
- Utilizar técnicas de lógica *fuzzy* associadas aos métodos de tomada de decisão em grupo;
- Registrar a opinião de profissionais especializados de forma a permitir consultas futuras.

Este trabalho é dividido em quatro tópicos, além da introdução. No tópico dois, serão mostrados conceitos sobre avaliação de riscos e métodos comumente utilizados. No tópico três, serão apresentados conceitos e trabalhos relacionados à tomada de decisão e critérios de avaliação de pesos de especialistas. No tópico quatro, será mostrado o estudo de caso e resultados obtidos. Por fim, no tópico cinco será apresentado a conclusão do trabalho.

2. Avaliação de Riscos

2.1. Risco

Apesar da existência de inúmeras definições sobre conceitos de risco em literatura específica, neste estudo adotou-se a definição de risco como a combinação da probabilidade de ocorrência de um acidente com a severidade de dano potencial deste acidente (lesão ou dano para a saúde de uma pessoa exposta). Sua representação matemática é definida pela seguinte expressão:

$$Ri = Pi \times Si \, , i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Onde Pi é a probabilidade de ocorrência do evento i, Si é a severidade do evento i [NFPA 2015], [OHSAS 2007].

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 severidade e a probabilidade de sua ocorrência [ISO 2009], [NFPA 2015].

A legislação sobre segurança em eletricidade vigente no Brasil (NR-10) determina que em todas as intervenções em instalações elétricas 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 trabalho [Brasil 2004].

Nos estudos de [Guo 2014] apresenta-se uma metodologia para avaliação de riscos de sistemas de automação em subestações, incluindo o cálculo da probabilidade de falhas e determinação de pesos da função de riscos utilizando a metodologia Analytic Hierarchy Process - AHP. Em [Dimopoulos 2012] realiza-se uma avaliação de risco envolvendo a probabilidade de eletrocussão em subestações relacionadas à sistemas de aterramento.

Diante do exposto, verifica-se que ambos os métodos de avaliação de risco em subestações necessitam do desenvolvimento de cálculos mais complexos. Esses adotam o mesmo conceito sobre risco. Utiliza-se a AHP para o estabelecimento dos pesos em [Guo 2014]. O método proposto nesta pesquisa tem como vantagem a obtenção da ponderação e ordenação dos fatores contribuintes de uma forma mais simplificada e objetiva. Considera-se esse fato relevante principalmente em situações onde haja a necessidade de se realizar uma avaliação mais ágil, como por exemplo, no mundo corporativo.

2.2. Técnicas de Análise de Risco

Em [De Siqueira e Souza 2010], é realizado a avaliação de riscos de acidentes graves em grandes centrais elétricas. 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; (2) divisão da planta e zoneamento das grandes estações para análise de risco; (3) identificação de sistemas de proteção automatizada; (4) modelagem probabilística de equipamentos e regimes de proteção; (5) estimativas das consequências para cada modo de falha; (6) cálculo e identificação de áreas de risco para subestação real; (7) estabelecimento das recomendações de manutenção e políticas de proteção para reduzir o risco. 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 na confiabilidade dos equipamentos de forma a reduzir os riscos da planta.

Conforme [NFPA 2015], 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. O método proposto adota as seguintes etapas: (1) identificação e análise os riscos elétricos; (2) identificação de tarefas a serem executadas; (3) documentação dos perigos associados a cada tarefa; (4) estimação do risco para cada par de perigos / tarefa; (5) determinação das medidas de proteção adequadas para reduzir o nível de risco. Por meio deste modelo, a NFPA 70E apresenta uma forma que prioriza a eliminação do risco, substituição de métodos ou dispositivos, estabelece medidas e controles de

engenharia, medidas administrativas, comportamentais e em última instância, propõe a adoção de equipamentos de proteção individual (EPIs) ao trabalhador. Além disso, a observância dos principais modos de falha é estabelecida pela NFPA 70E em seu anexo informativo F com intuito de contribuir na gestão do risco.

Em [ISO 2009], 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, com base nos resultados da análise de risco, sobre a quais riscos precisam de tratamento e a prioridade para a aplicação do tratamento); (4) tratamento de riscos (seleção de uma ou mais opções para modificar riscos). Ao longo dessas etapas são estabelecidas medidas de comunicação, monitoramento e avaliação periódica. Esse modelo é amplamente utilizado pelas grandes organizações mundiais.

Os três métodos propostos possuem características comuns, pois utilizam modelos probabilísticos para a determinação do nível do risco. Com a aplicação desses métodos também é possível estabelecer as prioridades de atuação mediante os problemas identificados. Uma característica marcante é o fato de que todos possuem etapas bem definidas de forma a atingir os objetivos propostos. Dois dos três métodos propostos utilizam como base conceitos das técnicas de módulos de falhas: a NFPA 70E e a ISO 31000 que são normas internacionalmente reconhecidas, o que reforça a confiabilidade dos modelos apresentados. O trabalho proposto para avaliar os riscos de grandes centrais elétricas possui maior complexidade de aplicação, se comparado aos demais métodos. Dessa forma, o uso dos conceitos definidos em [NFPA 2015] demonstra ser o mais adequado ao objetivo deste trabalho. O conteúdo desta norma foi concebido especificamente para aplicações em sistemas elétricos. O método proposto neste artigo tem como base os conceitos e premissas estabelecidos por esta norma, incluindo os seus anexos. Além disso, os conceitos definidos por [ISO 2009] são similares ao exposto em [NFPA 2015].

3. Tomada de Decisão

3.1. Tomada de Decisão Multicritério

O processo de Tomada de Decisão (Decision Making – DM) é definido, na maioria dos casos, como o ato de realizar a identificação, avaliação, comparação, ordenação, priorização e escolha mais racional das alternativas. Métodos matemáticos e técnicas específicas provenientes das diversas disciplinas, como por exemplo, engenharias, sociologia, psicologia, economia e ciência política podem ser adotadas para ajudar indivíduos a realizarem DMs de qualidade. Essas decisões podem impactar, inclusive, em questões relevantes de sustentabilidade mundial. Dessa forma é necessário que o decisor tenha ciência de forma sistêmica sobre os impactos ocasionados por suas escolhas [Pedrycz et al. 2011], [Saaty e Peniwati 2013].

Os autores [Saaty e Peniwati 2013] afirmam que a psicologia cognitiva sabe que a capacidade de realizar comparações é intrínseca do talento humano, sendo possível desenvolver e aprimorar tal habilidade. Enquanto os autores [Kacprzyk et al. 1992] declaram que o comportamento humano é raramente consistente mediante a realização da tomada de decisão. Graças à disponibilidade de poderosos modelos matemáticos, tem sido possível formalizar o comportamento humano de forma a satisfazer algumas condições naturais. Esses modelos vêm contribuindo com a popularização desse tipo de abordagem [Saaty e Peniwati 2013].

Uma das dificuldades relacionadas à tomada de decisão multicritério está relacionada ao uso eficaz das informações fornecidas pelo decisor, que normalmente são imprecisas e escassas. Dessa forma é necessário modelar informações fornecidas pelo decisor e suas incertezas no processo de tomada de decisão. A presença de mais de um critério já se caracteriza como um fator de incerteza [Ekel et al. 2007].

3.2. 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 e Parreiras 2009].

Estudos psicológicos têm mostrado que 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 criar uma grande influência nas mentes das pessoas envolvidas na atividade [Bernardes et al. 2008], [Saaty 1999], [Saaty e Peniwati 2013].

3.3. Métodos de Tomada de Decisão Multicritério em Grupo

Na literatura, diversos métodos são apresentados de forma a apoiar os especialistas nos processos de DM. São exemplos desses métodos:

Analytic Hierarchy Process (AHP): Desenvolvido por T.S. Saaty, consiste em uma metodologia de modelagem estrutural que, em adição à estruturação qualitativa, incorpora estrutura em forma de pesos [Saaty 1999], [Saaty e Peniwati 2013]. Esse método foi projetado para uso de seus praticantes, embora venha sendo utilizado para a resolução de problemas de maior complexidade. Além disso, a AHP pode ser utilizada com muitos tipos de dados, incluindo julgamentos baseados nas experiências e valores. Nos estudos de [Zhao et Al. 2014] utiliza-se essa metodologia para determinar valores dos pesos de probabilidade e severidade, de forma a estabelecer o nível de risco associado a falhas em sistemas de aviação. Já em [Zhang et al. 2009] realiza-se o cálculo do peso de cada especialista envolvido num processo de avaliação de risco de acidentes em tanques petroquímicos utilizando uma versão da *fuzzy* da Analytic Hierarchy Process (FAHP).

Fuzzy Set Based Consensus Scheme: O método de esquema de consenso com base em conjuntos *fuzzy*, proposto por [Orlovsky 1978], utiliza dos conceitos de relação de preferência *fuzzy*. Essa metodologia faz 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. Utilizam-se números *fuzzy* trapezoidais para melhor representar o pensamento humano e reduzir a subjetividade das respostas [Ekel e Parreiras 2008], [Ekel e Parreiras 2009], [Zhao et Al. 2014]. A aplicabilidade e a eficiência da metodologia proposta são demonstradas por meio de um estudo de caso relacionado com o planejamento estratégico na empresa de energia elétrica [Ekel e Parreiras 2009]. Em [Ekel e Parreiras 2008] apresenta-se uma metodologia envolvendo esquema de consenso de forma a resolver um problema de decisão multicritério, a partir de um procedimento baseado em modelagem de relações de preferência *fuzzy*.

Diante do exposto, adota-se o método FAHP neste trabalho devido à possibilidade de realizar a ponderação dos critérios pré-estabelecidos. Utiliza-se metodologia Fuzzy Set Based Consensus Scheme devido à sua forma simples de se avaliar o nível de concordância entre os especialistas. Essa informação é útil para guiar as discussões enfatizando os critérios em que ocorrem opiniões mais discordantes. A adoção de estimativas *fuzzy*, baseadas em números *fuzzy* trapezoidais, permite extrair com maior precisão as informações de cada especialista envolvido no processo de avaliação de risco.

3.4. Determinação dos Pesos dos Especialistas

A experiência profissional e acadêmica de cada especialista pode influenciar na avaliação do risco. A adoção de técnicas que permitem estabelecer o nível de conhecimento de cada especialista por meio da ponderação de suas opiniões pode contribuir com o resultado final de forma positiva [Ekel e Parreiras 2009], [Zhang et al. 2009]. Conforme [Ekel e Parreiras 2008],

ao considerar opiniões de diferentes pessoas é importante diferenciar os níveis de influência de cada indivíduo na construção da opinião coletiva. Dois tipos de influência devem ser distinguidos: (1) Papel do especialista na empresa, seu conhecimento e sua experiência sobre o problema em questão e a opinião de um profissional que tenha um conhecimento mais profundo do problema deve ser mais valorizada do que as demais. A forma mais comum de se incluir tal tipo de influência em um modelo de agregação é atribuindo-se coeficientes de importância (pesos) à opinião de cada membro do grupo. (2) Influência associada à opinião do especialista, sendo proporcional ao nível de concordância entre cada especialista e o resto do grupo.

O cálculo do peso de cada especialista pode ser obtido por meio da aplicação do método Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) [Zhang et al. 2009]. Esse permite aos especialistas utilizarem em sua plenitude sua valiosa experiência, habilidades de julgamento e proporcionar um forte apoio à tomada de decisão [Zhang et al. 2009]. Em particular, no trabalho de [Zhang et al. 2009], esse método foi utilizado no processo de ponderação das opiniões dos especialistas envolvidos na avaliação de segurança de tanques petroquímicos. Ainda em [Zhang et al. 2009], a avaliação do peso (ωi) de cada especialista inclui as seguintes etapas:

(1) Definição dos critérios de comparabilidade Ci={c1,c2,...,cn}: qualificação acadêmica, título profissional, cargo e tempo de experiência.
(2) Comparação dos critérios aplicando as definições de forma a construir a matriz de julgamento complementar *fuzzy* (A):

Definições: Para matriz A=(aij)nxn, se 0≤ aij ≤1 (i=1,2,...,n, j=1,2,...,n), então A é uma matriz *fuzzy*. Se aij + aji=1 (i=1,2,...,n, j=1,2,...,n), então A é uma matriz complementar *fuzzy*. A tabela I determina os níveis de graduação a serem utilizados na elaboração da matriz A.

TABELA I. GRADUAÇÃO E SIGNIFICADO DO JULGAMENTO

GRADUAÇÃO	SIGNIFICADO DO JULGAMENTO
0,5	Comparando os dois fatores, um é tão importante quanto o outro fator.
0,6	Comparando os dois fatores, um é um pouco mais importante que o outro fator.
0,7	Comparando os dois fatores, um é obviamente mais importante que o outro fator.
0,8	Comparando os dois fatores, um é muito mais importante que o outro fator.
0,9	Comparando os dois fatores, um é extremamente mais importante que o outro fator.
0,1 , 0,2 , 0,3 , 0,4	Se a relação de importância dos fatores aj é aij, desta forma a relação de importância dos fatores aj e ai é aji=1-aij.

Fonte: Adaptado pelo autor com dados de [Zhang et al. 2009].

(3) Determinação do peso (ωi) da matriz de julgamento complementar *fuzzy* de critério simples da matriz (A):

$$\omega i = \frac{\sum_{j=1}^{n} aij + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

$$\omega j = \frac{\sum_{j=1}^{n} aij + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Se A é uma matriz complementar *fuzzy*, $\omega_i = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ é o vetor prioritário de A, e então $W = (\omega_{ij})_{nxn}$ é a matriz de pesos de A, onde:

$$\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j + 0{,}5, i = 1, 2, \dots, n,\ j = 1,2, \dots, n. \quad (4)$$

(4) Verificação da consistência (CI) da matriz de julgamento complementar *fuzzy* A, utilizando a seguinte correlação:

$$CI(A, W) = \frac{1}{n^2}\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}|aij - \omega ij|\right). \quad (5)$$

Se o valor encontrado para $CI(A,W) < 0{,}1$ o resultado pode ser considerado aceitável. Caso negativo, rever a avaliação. Conforme [Zhang et al. 2009], valores inferiores a 0,1 são utilizados em situações onde são requeridos níveis elevados de segurança. Em [Xu 2002], realiza-se um estudo detalhado da consistência da matriz de julgamento complementar *fuzzy* e prova matematicamente a sua eficácia em tomadas de decisão.

4. Resultados

4.1. Aplicação do Método

O método proposto, denominado Avaliação de Fatores Contribuintes (AFC), consiste em realizar uma avaliação dos aspectos sistêmicos responsáveis pela ocorrência de acidentes nesse tipo de ambiente. Como estudo de caso realizou-se uma consulta junto a cinco especialistas com sólida experiência em subestações de energia. Esses profissionais foram convidados a responder um questionário composto, em sua primeira parte, por perguntas relacionadas ao seu tempo de experiência, formação acadêmica relacionada a sistemas elétricos e subestações e em segurança do trabalho. A segunda parte é formada por 42 módulos de falha extraídos do anexo informativo F de [NFPA 2015] e adaptados para a presente pesquisa. Esses módulos foram considerados como fatores contribuintes nesta análise. Cada item foi avaliado pelos especialistas considerando a seguinte problemática: Como a inobservância do modo de falha pode contribuir na ocorrência de acidentes pessoais em subestações de energia? Utiliza-se e escala de avaliação linguística graduada em cinco partes para responder a essa segunda parte: muito pouco, pouco, mediano, muito e extremamente, conforme Fig. 01.

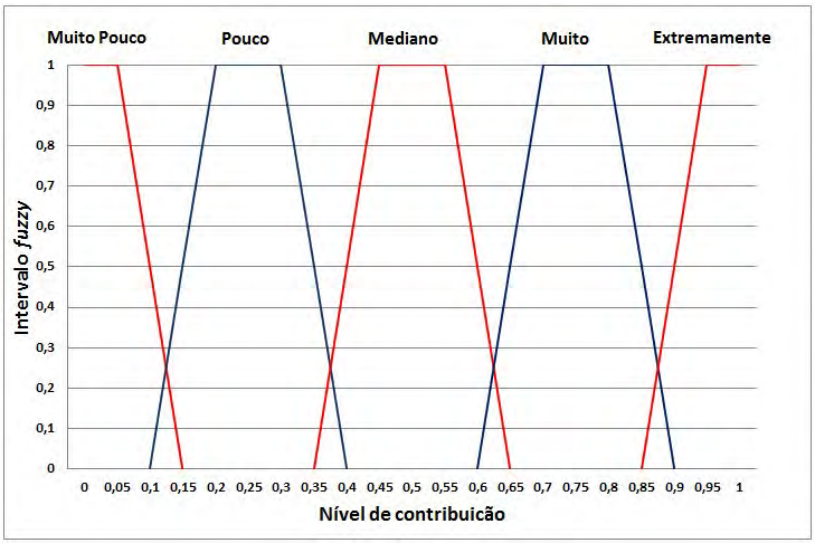

Figura 1. Hierarquia linguística *fuzzy* (Adaptado [Ekel e Parreiras 2009]).

4.2. Determinação dos Pesos dos Critérios

O estabelecimento dos pesos (ωi) dos critérios (C) de avaliação de cada especialista é determinado conforme as etapas descritas na seção anterior:

(1) Definição dos critérios (C) de avaliação dos especialistas conforme etapa (1):

C1 - Experiência em subestações (Anos de atuação direta);

C2 - Formação acadêmica em eletricidade com ênfase em subestações (Técnica, Graduação, Especialização/Mestrado e Doutorado);

C3 - Graduação profissional na corporação (Pleno, Sênior, Master, Especialista);

C4 - Formação em segurança do trabalho (Não possui, Técnico, Especialização, Mestrado/ Doutorado).

(2) Determinação da matriz (A) representada pela tabela II, conforme etapa (2) e critérios definidos pelo moderador, cálculo do peso (ωi) e (ωj) utilizando a equações (2) e (3).

(3) Determinação da matriz $W = (\omega_i)_{nxn}$ utilizando a equação (4) da etapa (3), representado pela tabela III.

TABELA II. MATRIZ (A), (ωi) e (ωj)

CRITÉRIO	C1	C2	C3	C4	SOMA	ωi
C1	0,5	0,6	0,7	0,9	2,7	0,308
C2	0,4	0,5	0,4	0,6	1,9	0,242
C3	0,3	0,6	0,5	0,7	2,1	0,258
C4	0,1	0,4	0,3	0,5	1,3	0,192
ωj	0,192	0,258	0,242	0,308	SOMA	1,00

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

(4) Teste da consistência CI(A, W) utilizando valores da tabela IV e equação (5) da etapa (4):

TABELA III. MATRIZ (W)

0,500	0,567	0,550	0,617
0,433	0,500	0,483	0,550
0,450	0,517	0,500	0,567
0,383	0,450	0,433	0,500

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

TABELA IV. MATRIZ CI(A,W)

0,000	0,033	0,150	0,283
-0,033	0,000	-0,083	0,050
-0,150	0,083	0,000	0,133
-0,283	-0,050	-0,133	0,000

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O valor encontrado para $CI(A, W) = 0{,}0917 < 0{,}1$. A consistência da matriz A é considerada aceitável. Desta mesma forma definem-se os pesos para os seguintes critérios: experiência, formação acadêmica, profissional e formação em segurança do trabalho representados na tabela V.

4.3. Determinação do Peso de Cada Especialista

O peso de cada especialista (ωei) é definido conforme as seguintes etapas:

(1) Cadastro do perfil de cada especialista (e) na tabela VI conforme questionário respondido;

(2) Determinação dos valores de C1(ωe1, ωe2, ωe3, ωe4 e ωe5) por meio de normatização e lógica *fuzzy*;

Os valores de C2, C3 e C4 apresentados na tabela VII são originados da tabela V e em função das respostas registradas na tabela VI. Multiplica-se o valor (ωi) da tabela II pelo (ωi) da tabela V conforme critério e perfil de cada especialista cadastrado na tabela VI.

(3) Soma dos valores individuais (ωe) por especialista (e) obtendo (ωes);

(4) Multiplicação de (ωes) por 0,2 obtendo (ωies) respeitando a equação 6;

(5) Divide-se o valor de (ωies) pela soma de todos (ωies), obtendo o peso (ωei) da opinião de cada especialista.

$$\omega ei1 + \omega ei2 + \omega ei3 + \omega ei4 + \omega ei5 = 1. \quad (6)$$

TABELA V. PESOS DOS CRITÉRIOS

CRITÉRIO	TIPO	ωi	CI(A,W)
EXPERIÊNCIA	C1 - EXPERIÊNCIA EM SUBESTAÇÃO	0,308	0,092
	C2 - FORMAÇÃO ACADÊMICA	0,242	
	C3 - GRADUAÇÃO PROFISSIONAL	0,258	
	C4 - ESPECIALIZAÇÃO SEGURANÇA	0,192	
ACADÊMICA	C1 - TÉCNICO	0,200	0,094
	C2 - GRADUAÇÃO	0,225	
	C3 - ESPECIALIZAÇÃO/ MESTRADO	0,267	
	C4 - DOUTORADO	0,308	
PROFISSIONAL	C1 - PLENO	0,192	0,092
	C2 - SENIOR	0,242	
	C3 - MASTER	0,258	
	C4 - ESPECIALISTA	0,308	
SEGURANÇA	C1 - NÃO POSSUI	0,183	0,094
	C2 - TÉCNICO	0,242	
	C3 - ESPECIALIZAÇÃO	0,275	
	C4 - MESTRADO/ DOUTORADO	0,300	

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

TABELA VI. PERFIL DOS ESPECIALISTAS

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO - EXPERIÊNCIA EM SUBESTAÇÃO						
CRITÉRIO	e1	e2	e3	e4	e5	*ωi*
C1	15	28	24	25	14	0,308
C2	Msc/Esp	Msc/Esp	Graduação	Msc/Esp	Graduação	0,242
C3	Sênior	Sênior	Sênior	Master	Pleno	0,258
C4	Não possui	Não possui	Especialização	Não possui	Não possui	0,192

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

TABELA VII. PESOS DOS ESPECIALISTAS

CRITÉRIO	ωe1	ωe2	ωe3	ωe4	ωe5
C1 - EXPERIÊNCIA EM SUBESTAÇÃO	0,165	0,308	0,264	0,275	0,154
C2 - FORMAÇÃO ACADÊMICA	0,064	0,064	0,054	0,064	0,054
C3 - GRADUAÇÃO PROFISSIONAL	0,080	0,080	0,080	0,067	0,050
C4 - ESPECIALIZAÇÃO SEGURANÇA	0,035	0,035	0,053	0,035	0,035
(ωes):	0,344	0,488	0,451	0,442	0,293
(ωies):	0,069	0,098	0,090	0,088	0,059
(ωei):	0,171	0,242	0,224	0,219	0,145

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

4.4. Avaliação dos Fatores Contribuintes

O método proposto neste trabalho consiste em identificar matematicamente a relevância de modos de falhas em função da problemática apresentada anteriormente. As etapas são descritas a seguir:

(1) Determinação dos fatores contribuintes: Selecionados quarenta e dois itens conforme a tabela X para compor o questionário a ser respondido pelos especialistas;
(2) Seleção dos cinco especialistas (e): baseou-se na análise de currículo, considerando principalmente uma sólida experiência com subestações de energia e envolvimento efetivo em atividades relacionadas à segurança em eletricidade;
(3) Pesquisa de avaliação: O questionário de avaliação foi estruturado, enviado por e-mail aos especialistas e consolidado utilizando o sistema web Google Forms;

(4) Observância do nível de consenso dos especialistas em cada fator contribuinte por meio de hierarquia linguística *fuzzy* conforme [Ekel e Parreiras 2008], [Ekel e Parreiras 2009] e tabela VIII;

TABELA VIII. AVALIAÇÃO E NÍVEL DE CONSENSO

CRITÉRIO	e1	e2	e3	e4	e5	(NC) GRUPO
C1	Extremamente	Muito	Muito	Muito	Muito	0,76

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

(5) Definição dos critérios (C) mais relevantes em função ordenação decrescente do peso (PC*i*) e do nível de consenso (NC) representados na tabela X. Para o cálculo do peso de cada critério (PC*i*) adotam-se as equações 7, 8, 9 e 10.

$$PPi = \omega ei \times Pi, i = 1, \dots, 5. \tag{7}$$

Os valores de P*i* variam linearmente conforme a avaliação do critério selecionado: muito baixo 0,2, baixo 0,4, mediano 0,6, alto 0,8 e extremamente 1.

$$GP = 0{,}2 \times \left(\sum_{j=1}^{n} PPi \right), i = 1, \dots, 5. \tag{8}$$

$$PE = \frac{GP}{0{,}2}. \tag{9}$$

$$PCi = \frac{PE}{\left(\sum_{j=1}^{n} PEi\right)}. \tag{10}$$

Onde n representa o número de fatores contribuintes, GP e PE*i* são variáveis intermediárias para se obter o valor do peso do fator contribuinte (PC*i*). A tabela IX apresenta um exemplo de avaliação de um critério considerando as equações 7, 8, 9 e 10.

TABELA IX. PESO DE CADA CRITÉRIO

CRITÉRIO	P1	P2	P3	P4	P5	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	GP	PEi	PCi
C1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,171	0,193	0,179	0,175	0,116	0,167	0,834	0,032

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5. Conclusão

Este trabalho introduziu os conceitos de Tomada de Decisão e FAHP na avaliação quantitativa da relevância de fatores contribuintes na ocorrência de acidentes em subestações de energia. Neste método valorizam-se as experiências individuais associadas às técnicas de tomada de decisão em grupo. Essas permitiram identificar com maior precisão a relevância da opinião individual de cada especialista, valorizando o conhecimento individual de cada envolvido e reduzindo a subjetividade de suas respostas. Como resultado foi possível determinar matematicamente o valor do peso de cada critério, dos especialistas e utilizar estes dados para ponderar a relevância dos fatores contribuintes previamente definidos. Desta forma é possível reduzir a subjetividade mediante um grande número de alternativas a serem analisadas, quantificadas, priorizadas e utilizadas na estratégia de prevenção de acidentes em subestações de energia e em processos de avaliação de riscos.

TABELA X. FATORES CONTRIBUINTES

MODO DE FALHA	Pci	NC
Análise de risco - Não considerado todas as tarefas, riscos, situações de risco, ou combinação destes	0,038	1
Comportamental - Antecipação de tarefas de forma inadequada	0,038	1
Comportamental - Competência e complacência	0,036	0,76
Comportamental - Incentivo para burlar ou reduzir a eficácia (motivação incorreta)	0,036	0,76
Análise de risco - Inexistência de sistema de permissão de trabalho	0,032	0,76
Instalação - Falha no sistema de proteção	0,030	0,74
Comportamental - Interação inesperada ou antecipada	0,030	0,74
Instalação - Insuficiente monitoramento, controle ou ações corretivas, ou combinação destas	0,030	0,56
Instalação - Depreciação de equipamentos	0,028	0,56
Instalação - Falha em componentes	0,028	0,56
Manutenção - Processo de aquisição inadequado	0,027	0,72
Comunicação - Falta de entendimento	0,027	0,64
EPIs - Trabalhadores esquessem de utilizar quando necessário	0,027	0,64
Procedimento - Insuficiente monitoramento, controle ou ações corretivas, ou combinação destas	0,027	0,64
Projeto - Cálculo incorreto (energia, toxicidade,elasticidade, durabilidade, etc.)	0,026	0,7
EPIs - Insuficiente monitoramento, controle ou ações corretivas, ou combinação destas	0,026	0,7
Procedimento - Inconsistência com a cultura corrente	0,026	0,68
Manutenção - Pressão excessiva por produção	0,026	0,64
EPIs - Especificação do EPI é inapropriada para os riscos envolvidos	0,026	0,64
Projeto - Montagem incorreta	0,024	0,7
Procedimento - Procedimentos não atualizados ou acessíveis	0,024	0,7
EPIs - Razão para utilização não compreendida	0,024	0,7
EPIs - Criação de barreiras para a realização eficaz do trabalho	0,024	0,6
Gestão - Insuficiente monitoramento, controle ou ações corretivas, ou combinação destas	0,024	0,6
Procedimento - Permitir pessoal tomar decisão de trabalhar em sistema energizado sem justificativa adequada	0,024	0,6
EPIs - Desconforto excessivo	0,023	1
EPIs - Vulnerabilidade não percebida	0,023	0,7
Procedimento - Instruções não claramente comunicada ou acessíveis	0,023	0,52
EPIs - Pressão produção não permitir tempo para usar ou manter	0,020	0,72
Treinamento - Treinamento não entendido	0,020	0,72
Treinamento - Riscos identificados não claramente comunicados	0,020	0,72
Sinalização - Excesso de sinais de alerta	0,018	0,7
Procedimento - Políticas e procedimentos inconsistentes	0,018	0,7
Treinamento - Depreciação do treinamento	0,018	0,64
Treinamento - Material de treinamento não possui detalhes sobre como executar o trabalho	0,017	0,7
Treinamento - Material de treinamento não atualizado	0,016	0,52
Projeto - Especificação, fabricação incorreta	0,015	0,74
Projeto - Pressão excessiva por produção	0,014	0,7
Treinamento - Treinamento não é consistente com as instruções	0,014	0,68
Projeto - Processo de aquisição inadequado	0,012	0,7
Treinamento - Instruções não consistentes com conteúdo de treinamento	0,011	0,7
Sinalização - Conteúdo demasiadamente genérico (ex, “Não toque em partes energizadas"; "Cuidado”.)	0,009	0,76

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Agradecimentos

Aos Engenheiros Eletricistas Adalton Sérgio Oliveira, Bruno Mazzini Muniz, Eduardo Antônio de Castro, Richard Nixon Buter e Roberto Márcio Moraes pela contribuição técnica. As demais pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta na concretização desta pesquisa.

Referências

Bernardes, P. et al. (2008). Fuzzy set based multicriteria decision making and its applications. PROGRESS IN NONLINEAR ANALYSIS RESEARCH, p. 243.

Brasil, (2004). Ministério do Trabalho e Emprego. NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego. Disponível em: < http://www.mtps.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR10.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2016.

Brenner, B. C. (2013). Improving workplace electrical safety through self-assessment. In: IEEE. Electrical Safety Workshop (ESW), IEEE IAS. [S.l.], p. 163_166.

Coge, F. Relatório (2010). Estatística de Acidentes no Setor Elétrico Brasileiro. Fundação COGE, 2010. Disponível em: <http://www.funcoge.org.br/csst//relat2010/index pt-.html>, acessado em 15/01/2016.
De Siqueira, I. P.; De Souza, B. A. (2010). Risk assessment of major accidents in large electric power plants Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES,1-7.
Dimopoulos, A. et al. (2012). Proposal for probabilistic risk assessment in grounding systems and its application to transmission substations. IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, v. 27, n. 4, p. 2219_2226.
Ekel, P.; Parreiras, R. (2008). Esquema de consenso para decisão em grupo por meio de avaliações linguísticas. XL SBPO 2008 - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento, p. 962-973.
Ekel, P.; Parreiras, R. (2009). Procedimentos para tomada de decisão multicritério em grupo usando modelagem das relações de preferência fuzzy. XLI SBPO 2009 – Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento, p. 1789-1800.
Ekel, P. Y.; Menezes, M.; Neto, F. H. S. (2007). Decision making in a fuzzy environment and its application to multicriteria power engineering problems. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, Elsevier, v. 1, n. 4, p. 527_536.
Floyd, H. L. (2014). A systems safety approach to occupational electrical safety. In: IEEE. Cement Industry Technical Conference (CIC), 2014 IEEE-IAS/PCA. [S.l.], p.1_17.
International, (2012) E. S. F. Workplace electrical injury and fatality statistics, 2003-2010. Rosslyn, VA: ESFI.
Guo, J. et al. Security risk assessment and weaknesses identification of the substation automation system. In: IEEE. Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on. [S.l.], 2014. p. 1881_1888.
ISO, (2009). ISO 31000 2009 - Risk management, International Organization for Standardization, ISO, English.
Kacprzyk, J.; Fedrizzi, M.; Nurmi, H. (1992). Group decision making and consensus under fuzzy preferences and fuzzy majority. Fuzzy Sets and Systems, Elsevier, v. 49, n. 1, p. 21_31.
NFPA, (2015). NFPA 70E: Standard For Electrical Safety In The Workplace, National Fire Protection Association (NFPA), English.
OHSAS, (2007), 18001:2007 Occupational Health and Safety Management BSI Group.
Orlovsky, S. (1978), Decision-making with a fuzzy preference relation. Fuzzy sets and systems, Elsevier, v. 1, n. 3, p. 155167.
Pedrycz, W.; Ekel, P.; Parreiras, R. (2011). Fuzzy multicriteria decision-making: models, methods and applications. John Wiley & Sons.
Saaty, T. L. (1999). Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. [S.l.]: RWS publications.
Saaty, T. L.; Peniwati, K. (2013). Group decision making: drawing out and reconciling differences. [S.l.]: RWS publications.
Siqueira, I. P. de; Souza, B. A. de. (2010). Risk assessment of major accidents in large electric power plants. In: IEEE. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES. [S.l.], p. 1_7.
Xu, Z.; (2002). Research on compatibility and consistency of fuzzy complementary judgment matrices; Journal of PLA University of Science and Technology, v.3, p. 94-96.
Zhang, J.; Fan, J.; Zhang, L. (2009). The application of fuzzy decision-making in the solving of petroleum and petrochemical accident probability. In: IEEE. Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009. FSKD'09. Sixth International Conference on. [S.l.], v. 7, p. 386391.
Zhao, Y.; Jiao, J.; Zhao, T. (2014) A synthetic risk assessment model based on ahp. In: IEEE. Reliability and Maintainability Symposium. [S.l.], 2014. p. 1-6.