



ANÁLISE DE NORMAS E REGULAMENTAÇÕES DE ARCOS ELÉTRICOS DE ALTA
ENERGIA EM INSTALAÇÕES NUCLEARES: UMA PROPOSTA INICIAL PARA
ELABORAÇÃO DE UMA REGULAMENTAÇÃO PARA O BRASIL

Isis Silva de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação de Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Rio de Janeiro
Dezembro de 2024

ANÁLISE DE NORMAS E REGULAMENTAÇÕES DE ARCOS ELÉTRICOS DE ALTA
ENERGIA EM INSTALAÇÕES NUCLEARES: UMA PROPOSTA INICIAL PARA
ELABORAÇÃO DE UMA REGULAMENTAÇÃO PARA O BRASIL

Isis Silva de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Aprovada por: Prof.^a. Andressa dos Santos Nicolau

Prof. Claudio Marcio do Nascimento Abreu Pereira

Prof. Pedro Luiz da Cruz Saldanha

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2024

Oliveira, Isis Silva

Análise de Normas e Regulamentações de Arcos Elétricos de Alta Energia em Instalações Nucleares: Uma Proposta Inicial para elaboração de uma Regulamentação para o Brasil / Isis Silva de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XIV, 97 p.: il.; 29,7 cm

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 80-88

1. Falhas de Arco Elétrico de Alta Energia (HEAF).
2. Segurança Nuclear. 3. Regulamentação Internacional. I. Nicolau, Andressa dos Santos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

DEDICATÓRIA

Ao meu querido marido, Paulo, pelo amor, apoio incondicional e por ser minha fortaleza nos momentos mais difíceis. É a você que dedico este trabalho, com todo o meu carinho e gratidão.

E aos meus pais, Vanderlei e Eleni (in memoriam), que permanecem vivos em meu coração e em tudo que sou. Sei que, onde quer que estejam, compartilham comigo a alegria desta conquista. Dedico a vocês, com amor eterno e saudade.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de muitas mãos e corações, e não poderia deixar de agradecer àqueles que contribuíram direta ou indiretamente para sua realização.

À minha orientadora, Andressa dos Santos Nicolau, pela sua doçura, firmeza, profissionalismo e incrível capacidade de acreditar no potencial dos outros. Sua orientação cuidadosa e motivadora foi essencial para que eu superasse os momentos de dúvida e avançasse com confiança. Obrigada por confiar na minha ideia e por ser uma mentora atenta, inspiradora e indispensável nesta jornada.

À COPPE, pelo ambiente enriquecedor e pelo suporte institucional que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus colegas de trabalho: Tob Albuquerque, que leu inúmeros rascunhos com paciência e sempre se dispôs a colaborar; Leandro Araujo, por seus conselhos e por não me deixar desanimar; Patrícia Duarte pelos conselhos gentis e sinceros e Mario, pela força e indicação da orientadora – este favor ficará marcado para sempre.

Ao meu chefe, Yran Leite Maia, por seu incentivo e compreensão ao longo desta jornada, que tornaram possível equilibrar as demandas profissionais e acadêmicas.

À Amazul, por proporcionar os recursos e o ambiente profissional que contribuíram para o avanço deste estudo.

À Pai Benedito pelos seus bons conselhos e seu colo amoroso e a seu Zé Pilintra que ajudou inclusive com sugestões para o texto desta dissertação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, meu sincero e profundo agradecimento.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DE NORMAS E REGULAMENTAÇÕES DE ARCOS ELÉTRICOS DE ALTA ENERGIA EM INSTALAÇÕES NUCLEARES: UMA PROPOSTA INICIAL PARA ELABORAÇÃO DE UMA REGULAMENTAÇÃO PARA O BRASIL

Isis Silva de Oliveira

Dezembro/2024

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Programa: Engenharia Nuclear

Os incidentes envolvendo Arcos Elétricos de Alta Energia (High Energy Arcing Faults - HEAF) têm gerado crescente preocupação devido ao potencial para causar incêndios e danos severos a equipamentos e infraestruturas em instalações nucleares. Acidentes como os registrados nas usinas nucleares de Maanshan (2001) e Onagawa (2011) evidenciam a necessidade de estudos mais aprofundados sobre eventos HEAF para aumentar a segurança das instalações nucleares. Em resposta a essas preocupações, diversos órgãos reguladores e organizações internacionais, como a Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos (*Nuclear Regulatory Commission - NRC*), e as orientações da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (*Organization for Economic Co-Operation and Development - OECD*), desenvolveram diretrizes e regulamentações específicas para mitigar os riscos associados a esses eventos. Esse cenário destaca a urgência de reforçar medidas de segurança em nível global e nacional.

Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo, a partir da análise das normas internacionais e das publicações pertinentes ao tema HEAF, fornecer subsídios e propor uma proposta inicial de regulamentação para o Brasil, com o propósito de fortalecer o arcabouço regulatório brasileiro, contribuindo para a segurança das instalações nucleares e promovendo alinhamento com as melhores práticas internacionais. A metodologia de pesquisa empregada inclui uma análise bibliométrica da produção acadêmica relacionada ao tema em plantas nucleares, evidenciando tanto o número reduzido de estudos publicados quanto a escassez de discussões focadas em regulamentações. Além disso, foi identificada uma lacuna significativa na legislação brasileira sobre o assunto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF STANDARDS AND REGULATIONS FOR HIGH ENERGY ARCING
FAULT IN NUCLEAR FACILITIES: AN INITIAL PROPOSAL FOR THE
PREPARATION OF REGULATIONS FOR BRAZIL

Isis Silva de Oliveira

December/2024

Advisor: Andressa dos Santos Nicolau

Department: Nuclear Engineering

Incidents involving High Energy Arcing Faults (HEAF) have raised increasing concerns due to their potential to cause fires and severe damage to equipment and infrastructure in nuclear facilities. Accidents such as those recorded at the Maanshan Nuclear Power Plant (2001) and Onagawa Nuclear Power Plant (2011) highlight the need for more in-depth studies on HEAF events to enhance the safety of nuclear installations. In response to these concerns, various regulatory bodies and international organizations, such as the United States Nuclear Regulatory Commission (NRC) and the guidelines from the Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD), have developed specific regulations and guidance to mitigate the risks associated with these events. This scenario underscores the urgency of strengthening safety measures at both global and national levels.

Within this context, this study aims to analyze international standards and relevant publications on HEAF to provide insights and propose an initial regulatory framework for Brazil. The goal is to strengthen the Brazilian regulatory framework, contributing to the safety of nuclear facilities and promoting alignment with international best practices. The research methodology includes a bibliometric analysis of academic production related to the topic in nuclear plants, revealing both the limited number of published studies and the scarcity of discussions focused on regulations. Furthermore, a significant gap in Brazilian legislation on this subject was identified.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA HEAF.....	4
2.1. O ARCO ELÉTRICO.....	4
2.2. FALHAS DE ARCO ELÉTRICO DE ALTA ENERGIA (HEAF).....	6
2.2.1. CAUSA DA FALHA E EQUIPAMENTOS EM QUE O HEAF É MAIS RECORRENTE.....	7
2.3. ACIDENTES HEAF EM INSTALAÇÕES NUCLEARES.....	9
2.3.1. EVENTO OCORRIDO EM ONAGAWA.....	9
2.3.2. EVENTO OCORRIDO EM MAANSHAN.....	13
2.3.3. ACIDENTES EM SONGS, ONCONEE E WATERFORD.....	15
2.4. A CNEN E O DESAFIO REGULATÓRIO FRENTE AOS RISCOS DE HEAF	16
3. METODOLOGIA.....	17
3.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	17
3.1.1. PROCEDIMENTO DE BUSCA.....	18
3.1.2. PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS.....	21
3.1.3. COLETA E TRATAMENTO INICIAL DOS DADOS.....	22
3.1.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	24
3.2. ANÁLISE DO VOSVIEWER PARA O <i>SCOPUS</i>	25
3.2.1. REDE DE COAUTORIA.....	25
3.2.2. REDE DE COAUTORIA POR PAÍSES.....	27
3.3. ANÁLISE DO VOSVIEWER PARA O <i>WEB OF SCIENCE</i>	28
3.3.1. REDE DE COAUTORIA.....	28
3.3.2. REDE DE COAUTORIA POR PAÍSES.....	29
3.3.3. REDE DE CITAÇÃO POR AUTORES.....	29
3.4. ANÁLISE DO VOSVIEWER PARA A BIBLIOTECA UNIFICADA.....	30
3.4.1. REDE DE COAUTORIA.....	31
3.4.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	31

4. INVESTIGAÇÃO DOS DOCUMENTOS ENCONTRADOS PELA ANÁLISE BIBLIOMETRICA.....	34
4.1. INICIATIVAS DE PESQUISAS NOS ANOS 2000	34
4.1.2. EPRI 1011989/NUREG/CR-6850.....	34
4.1.3. IEEE-1584 E NFPA-70E.....	36
4.1.4. INCÊNDIOS DE FALHAS DE ARCO DE ALTA ENERGIA EM EQUIPAMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO, UMA REVISÃO DE LITERATURA	37
4.1.5. A BASE DE DADOS FIRE DA OECD.....	38
4.1.6. EVENTOS HEAF NA ALEMANHA.....	38
4.1.7. OECD PROJETO FIRE – RELATÓRIO TÓPICO Nº. 1	41
4.1.8. CONSEQUÊNCIAS DO RELATÓRIO TÓPICO Nº. 1.....	43
4.1.9. NUREG-2169	44
4.1.10. RELATÓRIO NEA/CSNI/R(2015)10.....	44
4.1.11. NUREG/IA-0470.....	46
4.1.12. RELATÓRIO NEA/CSNI/R(2017)7.....	48
4.1.13. PROGRAMA DE QUESTÕES GENÉRICAS – PRE-GI-018	49
4.1.14. TABELA DE IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FENÔMENOS - PIRT	50
4.1.15. PROGRAMA DE TESTES DA OECD	52
4.1.16. EVENTOS COMBINADOS	53
4.1.17. NUREG-2262	55
5. NORMAS E REGULAMENTAÇÕES MUNDIAIS	64
5.1. ALEMANHA	64
5.2. JAPÃO.....	65
5.3. AIEA.....	67
5.3.1. SSG-64: PROTEÇÃO CONTRA PERIGOS INTERNOS NO PROJETO DE CENTRAIS NUCLEARES	67
5.3.2. SSG-3: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE APS NÍVEL 1 PARA USINAS NUCLEARES	67

5.3.3. AIEA TECDOC-1944: PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO EM USINAS NUCLEARES.....	68
5.3.4. DIRETRIZES DO IRS - EDIÇÃO 2022.....	68
5.4. EUA - NRC	69
5.5. BRASIL – NORMA CNEN NN 2.03	70
6. RESULTADOS	72
6.1. CONSEQUÊNCIAS DA AUSÊNCIA DE REGULAMENTAÇÃO ESPECÍFICA PARA O HEAF	72
6.2. PROPOSTA INICIAL DE REGULAMENTAÇÃO PARA O HEAF NO BRASIL	72
6.3. POSSÍVEIS ADEQUAÇÕES DAS NORMAS INTERNACIONAIS AO CONTEXTO BRASILEIRO	73
6.4. DESAFIOS E CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS	77
7. CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
7.1. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
9. ANEXOS.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Natureza direcional geral de um arco – Adaptado de (LANG, NEAL, 2007)	5
Figura 2 - Desenho simplificado do evento HEAF ocorrido em Onagawa. Adaptado de NEA (2013)	10
Figura 3 - Gabinete elétrico com o setor onde começou o incêndio e outros gabinetes prejudicados (KABASHIMA, KASAHARA, 2019)	13
Figura 4 - HEAF em SONGS 2001 (RAUGHLEY, LANIK, 2002)	16
Figura 5 - print da busca avançada do Google Acadêmico	21
Figura 6 - Artigos por fonte	24
Figura 7- Autores que publicaram sobre o tema (High Energy Arcing Fault) isoladamente e em conjunto	26
Figura 8- Rede de coautoria por países, lado direito com China em destaque	27
Figura 9- WOS: Autores que publicaram sobre o tema (High Energy Arcing Fault) isoladamente e em conjunto	28
Figura 10 – WOS: Rede de coautoria por países	29
Figura 11 - WOS: Rede de citação por autor	30
Figura 12 - Mapa de coautoria da biblioteca única	31
Figura 13 - Artigos aceitos após triagem	32
Figura 14 - Número de artigos publicados por ano	32
Figura 15 - Relação entre HEAF e Arco Elétrico - figura adaptada de NRC (2018a)	33
Figura 16 - ZOI conforme NUREG/CR-6850, adaptado de (TAYLOR, Gabriel, 2019)	35
Figura 17 - Diferentes tipos de combinações de incêndios com outros eventos. Adaptado de NEA (2016)	54
Figura 18 - Zona HEAF - diagrama unifilar de SDE simplificado de usina nuclear. Adaptado de NRC (2023a)	57
Figura 19 - Exemplo de contagem de acordo com a NUREG-2262 para painel de MT, adaptado de NRC (2023a)	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Bases utilizadas na busca	18
Tabela 2 – <i>String</i> de busca utilizadas nas principais bases de dados	19
Tabela 3 – Notas atribuídas a cada resposta	24
Tabela 4 - Zonas HEAF.....	58
Tabela 5 – Comparação temporal de estimativas de frequência de ignição de incêndio HEAF.....	60
Tabela 6 - Situação atual do requisito alterado no Japão (em agosto de 2017).....	66
Tabela 7 - Medidas adotadas por países para mitigação de eventos HEAF	75

LISTA DE ABREVIATURAS

- ANVS** – *Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming*
- APR** – Avaliação Probabilística de Risco
- APS** – Análise Probabilística de Segurança
- ASP** – *Accident Sequence Program*
- BD** – *Bus Duct*
- BDSAT** – *Bus Duct Between Sat and Zone 1*
- BDUAT** – *Bus Duct Between Uat and Zone 1*
- CA** – Corrente Alternada
- CCDP** – *Conditional Core Damage Probability*
- CCM** – Centro de Controle de Motores
- CDF** – *Core Damage Frequency*
- CFD** – *Computational Fluid Dynamics*
- CRIEPI** - *Central Research Institute of Electric Power Industry (Japan).*
- EPI** – Equipamentos de Proteção Individual
- EPRI** – *Electric Power Research Institute*
- FIRE** – *Fire Incidents Records Exchange*
- FMEA** – *Failure Mode and Effect Analysis*
- GI** – *Generic Issue*
- GRS** – *Gesellschaft für Anlagen - und Reaktorsicherheit*
- GSU** - *Generator Step-up Transformer*
- HAZOP** – *Hazard and Operability Study*
- HEAF** – *High Energy Arcing Fault*
- IAEA** – *International Atomic Energy Agency*
- IEEE** – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*
- INES** – *International Nuclear Event Scale*
- IPBD** – *Iso-Phase Bus Duct*
- IRS** – *International Reporting System*
- KTA** – *Kerntechnischer AuSEChuss*
- LABGENE** – Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica
- LVBD** – *Low Voltage Bus Duct*
- LOCA** – *Loss-of-Coolant-Accident*

MBB – *Magne-Blast Breakers*
NFPA – *National Fire Protection Association*
NRA – *Nuclear Regulation Authority*
NRC – *Nuclear Regulatory Commission*
NSBD – *Non-Segregated Bus Duct*
OECD – *Organization for Economic Co-Operation and Development*
PD – *Painel de Distribuição*
PIRT – *Phenomena Identification and Ranking Table*
RES – *Office of Nuclear Regulatory Research (United States)*
RHR – *Heat Removal System*
RMB – *Reator Multipropósito Brasileiro*
RPV – *Vaso De Pressão do Reator*
SAT – *Station Auxiliary Transformer*
SDE – *Sistema de Distribuição Elétrica*
SEC – *Sistemas, Estruturas e Componentes*
S/NRA/R – *Secretariat of Nuclear Regulatory Authority*
SONGS – *San Onofre Nuclear Generating Station*
SRV – *Safety Relief Valve*
UAT – *Unit Auxiliary Transformer*
ST – *Start-Up Transformer*
ZOI – *Zone of Influence*

1. INTRODUÇÃO

A segurança nas usinas nucleares é considerada de extrema importância para os reguladores, assim como para a comunidade global, impulsionados pela necessidade de proteger tanto o meio ambiente, quanto as vidas humanas de potenciais riscos associados à geração de energia nuclear. Em razão disso, pesquisas de diversos países, tais como Estados Unidos (EUA), Alemanha, Japão etc., (NEA, 2013), relacionadas a incêndios em instalações nucleares mostraram que houve vários incidentes dignos de relato, incluindo explosões não químicas e incêndios rápidos decorrentes de falhas de arco de alta energia (do inglês, *High Energy Arcing Fault* - HEAF) em equipamentos de alta tensão, como disjuntores e comutadores. Estes eventos podem resultar em falhas catastróficas de sistemas elétricos, incêndios e, em casos extremos, comprometer a integridade dos reatores nucleares.

Os eventos HEAF são caracterizados por liberações repentinas e intensas de energia elétrica, que ocorrem quando um arco elétrico se forma devido a falhas nos equipamentos elétricos de média e alta tensão. Esses arcos podem gerar temperaturas extremamente elevadas, explosões com ejeção de projéteis em alta velocidade compostos pelos componentes elétricos do painel ou pelo próprio gabinete de origem, podendo ocasionar danos graves aos equipamentos elétricos e estruturas próximas, com o potencial para induzir um evento inicial (por exemplo, perda de água de resfriamento, desligamento do reator) (COYNE, MELLY, *et al.*, 2022) além de representar um risco elevado de incêndio e falhas subsequentes e portanto apresentar riscos significativos à segurança das operações.

Dada a complexidade e a gravidade desses incidentes que podem levar a acidentes, se faz necessário que as usinas nucleares adotem procedimentos rigorosos para prevenir a ocorrência deste fenômeno de modo a garantir uma resposta eficaz para mitigar as consequências.

Apesar do avanço significativo nas regulamentações internacionais, uma análise mais aprofundada revela uma lacuna no cenário brasileiro. Diferentemente de outros países, o Brasil ainda não possui regulamentações específicas para tratar os riscos associados aos HEAF em suas instalações nucleares. Essa ausência de diretrizes nacionais representa um

desafio considerável para garantir a segurança operacional das plantas nucleares brasileiras.

As regulamentações brasileiras para a segurança nuclear são de responsabilidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) que possuem suas normativas e são complementadas por normas e guias internacionais, como as da Agência internacional de energia atômica (do inglês, *International Atomic Energy Agency* – IAEA) e da NRC. No entanto, a ausência de diretrizes específicas para HEAF impede que medidas preventivas e de mitigação sejam claramente definidas e implementadas, comprometendo a resiliência das plantas nucleares contra esses eventos, deixando as instalações nucleares brasileiras potencialmente vulneráveis a esse tipo de falha.

Para preencher esta lacuna, esta dissertação propõe uma análise das normas e regulamentações existentes, tanto nacionais quanto internacionais, e recomenda uma proposta inicial de regulamentação de HEAF a partir de melhorias e adaptações para o contexto brasileiro. Atualmente, o país conta com duas usinas nucleares em operação: Angra 1, que entrou em operação em 1985, e Angra 2, que começou a operar em 2000 (FERREIRA, 2023). Futuramente, está previsto mais uma usina nuclear, Angra 3, o Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica (LABGENE) (MARINHA DO BRASIL, 2022), o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) (CNEN, 2021a) e, também, o submarino nuclear brasileiro, atualmente chamado de SNCA – Submarino Nuclear Convencionalmente Armado (MARINHA DO BRASIL, 2023).

Para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente foi realizada uma análise bibliométrica para o levantamento de documentos (normas nacionais e internacionais, regulamentos e artigos) relacionados com o HEAF. Em seguida foram selecionados os documentos mais relevantes para o estudo. E com base nos documentos selecionados uma proposta inicial de alteração da norma existente no Brasil foi elaborada.

Este trabalho está estruturado em 7 capítulos descritos sumariamente a seguir.

No capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos, nos quais os conceitos principais foram definidos, seguidos de um levantamento de acidentes históricos em locais como Onagawa (Japão), Maanshan (Taiwan) e instalações nos EUA (SONGS, Waterford e Oconee), fornecendo a base necessária para a elaboração desta dissertação, e uma introdução sobre o papel da CNEN e a norma de incêndio para usinas nucleares brasileiras.

O capítulo 3 trata da análise bibliométrica e revisão da literatura existente, onde são identificados os documentos mais relevantes, os autores mais recorrentes e os países que mais publicaram sobre HEAF.

No capítulo 4 são investigados os documentos mais relevantes encontrados na análise bibliométrica, quanto aos eventos HEAF, sua evolução e importância no contexto da segurança nuclear.

O Capítulo 5 analisa normas e regulamentações internacionais existentes, com foco em impedir e mitigar os efeitos dos eventos HEAF.

No capítulo 6, são apontados os impactos da ausência de regulamentações, e como parte da solução foi proposta uma regulamentação inicial para o HEAF no Brasil.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA HEAF

Nesta seção, são apresentados os conceitos e definições essenciais para a compreensão da análise de HEAF em plantas nucleares. A correta compreensão desses termos é fundamental para a discussão e análise desse trabalho. A introdução desses conceitos visa proporcionar uma base para compreensão geral do tema abordado.

Para estabelecer um entendimento comum, esta seção detalha os principais conceitos relacionados ao evento HEAF, incluindo sua definição técnica, os mecanismos de formação, os fatores de risco e os impactos potenciais.

2.1. O ARCO ELÉTRICO

Arco elétrico significa a passagem de corrente elétrica através do que antes era ar. (DAS, 2021) Este fenômeno físico foi descrito pela NUREG/CR-6850 (NRC, 2009) como uma descarga muito intensa de elétrons entre dois eletrodos que estão transportando uma corrente elétrica. O arco é criado pelo fluxo de elétrons, através de partículas carregadas eletricamente (gás ionizado), decorrente da vaporização do material condutor.

Em geral o arco é um evento indesejável no sistema elétrico e usualmente é descrito como uma “falha de arco”. Em DAS (2020) é ressaltado que esta é uma condição perigosa associada à liberação inesperada de uma grande quantidade de energia. Essa liberação se dá por meio de uma intensa emissão de luz, calor e a explosão de produtos de arco que consistem em componentes vaporizados do material do invólucro - cobre, aço ou alumínio. Também se faz presente um estrondoso som e uma pressão intensa que emana do arco elétrico, conferindo a ele semelhanças a uma explosão confinada.

LANG e NEAL (2007) descrevem que o comportamento de um arco elétrico é caracterizado por sua natureza caótica, que envolve mudanças rápidas e irregulares em sua geometria. Esse fenômeno é atribuído à convecção, jatos de plasma e forças eletromagnéticas. A Figura 1 demonstra a natureza direcional geral de um arco.

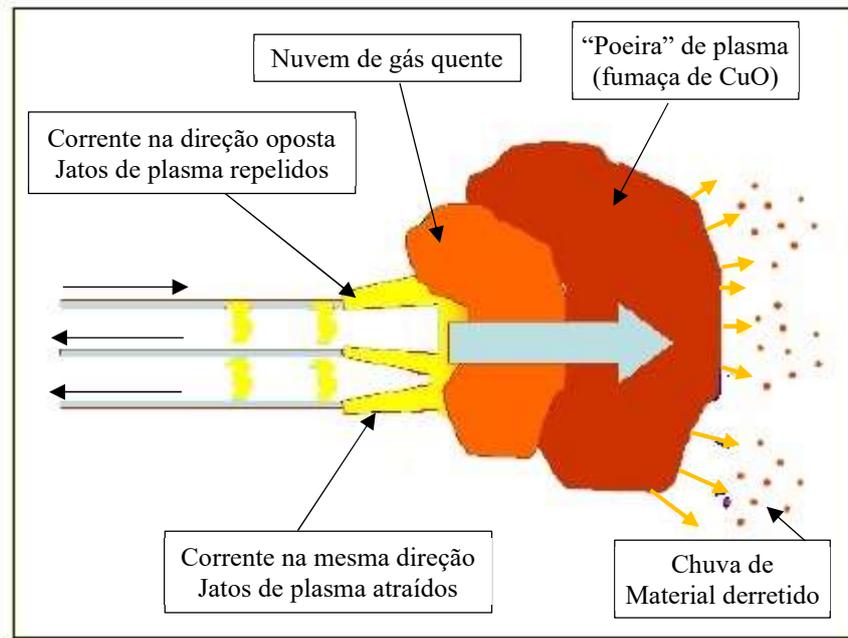


Figura 1 - Natureza direcional geral de um arco – Adaptado de (LANG, NEAL, 2007)

A grande contribuição para esse assunto veio em 1981 quando Ralph Lee (LEE, 1981), em seu artigo “*The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*”, abordou o tema arco elétrico, e foi o primeiro a propor uma modelagem matemática consistente para o cálculo da energia incidente. Lee define que o arco elétrico é o resultado da ruptura dielétrica do ar ou outro meio isolante e é uma das maiores e mais intensas fonte de calor do planeta, podendo chegar à temperatura de 20000°C , que é quatro vezes maior do que a temperatura na superfície do Sol, e causar queimaduras fatais em até 1,5 metros de distância e queimaduras graves em até 3 metros do local da ocorrência do arco.

Essas temperaturas são suficientemente elevadas para superaquecer o meio de propagação (ar) e, ao mesmo tempo, derreter e/ou vaporizar os materiais que entram em contato com o plasma (AMMERMAN, GAMMON, *et al.*, 2008). Durante falhas de arco, quando ocorre a vaporização dos materiais do eletrodo, há uma notável expansão de volume, principalmente no cobre, que se expande 67000 vezes (em comparação com a água, que se expande 1670 vezes). Este calor intenso causa uma expansão súbita do ar, gerando uma explosão acompanhada de ondas de alta pressão, chamada explosão de arco, que lançam estilhaços ou podem pulverizar gotículas de metal fundido em alta velocidade, como as ondas de pressão resultantes da explosão, podendo atingir valores medidos superiores a $95,76\text{ kPa}$, o que resulta em ferimentos graves para as pessoas que estejam

no local. Já em espaços confinados, como uma sala pequena ou um gabinete elétrico, a explosão pode se tornar mais direcionada, ampliada e mais severa (DAS, 2021).

ARMIJO, JOHNSON, et al. (2016) afirma que as temperaturas geradas por eventos de arco voltaico têm o potencial de vaporizar todos os materiais conhecidos, resultando na formação de subprodutos altamente tóxicos, devido a formação da nuvem de plasma que pode conter substâncias provenientes da fusão do eletrodo e subprodutos gerados da queima do isolamento dos equipamentos. A formação de óxidos de cobre, que são especialmente letais, ocorre quando o vapor de cobre resfriado se combina com o oxigênio, resultando na geração de toxinas prejudiciais para os pulmões, pele e olhos (AMMERMAN, GAMMON, *et al.*, 2008). Os gases que se expandem rapidamente fazem com que estilhaços sejam lançados de uma explosão de arco, resultando em ferimentos graves, semelhantes aos causados por armas projetadas para guerras.

2.2. FALHAS DE ARCO ELÉTRICO DE ALTA ENERGIA (HEAF)

Falha de arco elétrico de alta energia, doravante HEAF, são falhas energéticas ou explosivas de equipamentos elétricos que se caracterizam pela rápida liberação de energia na forma de calor, luz, vaporização de metal e aumento da pressão, devido à formação de arcos de alta corrente entre condutores elétricos carregados ou entre componentes elétricos energizados e o condutor neutro ou terra. Os eventos HEAF também podem resultar na ejeção de projéteis do gabinete elétrico de origem e resultar em incêndio (NEA, 2013).

Pode-se dizer que HEAF é um tipo específico de arco elétrico que ocorre em sistemas elétricos de média e alta tensão e potência, tipicamente em instalações industriais ou de geração de energia.

A NUREG/CR-6850 (NRC, 2009) define essa forma de falha como o resultado de uma rápida liberação de energia elétrica na forma de calor, vaporização de cobre, ou alumínio e força mecânica. Contudo, esta norma expõe um aspecto singular do HEAF, no qual o cenário de falha energética consiste em duas fases distintas, cada uma com característica de dano, resposta, eficácia de detecção e supressão próprias:

1. A primeira fase envolve uma rápida e breve liberação de energia elétrica, que pode causar a expulsão de projéteis, como metal derretido e componentes elétricos ou carcaças danificadas, que podem ser inflamados durante a fase energética.

2. A segunda fase consiste no incêndio subsequente que pode afetar o próprio dispositivo elétrico, bem como quaisquer combustíveis externos expostos, como bandejas de cabos ou painéis adjacentes descritos dentro da zona de influência.

Existe uma divergência na definição de HEAF: Segundo a NUREG/CR-6850 e relatórios da OECD, um evento só é considerado HEAF se houver um arco elétrico seguido de um incêndio subsequente. No entanto, a NRC apresenta uma definição diferente no documento (NRC, 2018a), onde o HEAF é descrito como um arco de longa duração, em contraste com a maioria dos arcos elétricos que se auto extinguem em poucos ciclos.

Por outro lado, a EPRI, em sua publicação, (HUGHES, 2017, p.5) afirma que:

“HEAF são caracterizados por uma falha elétrica com rápida liberação de energia na forma de calor e força mecânica. Os eventos HEAF são geralmente caracterizados por dois perigos distintos, conforme descrito por códigos elétricos, padrões e literatura. Esta definição de HEAF é consistente com os padrões de consenso da indústria (IEEE, 2018, NFPA, 2017).”

A EPRI conclui que a definição apresentada não é a mesma que a do NUREG/CR-6850 e dos relatórios da OECD, argumentando que, conforme evidenciado por eventos reais e dados de testes, nem todos os eventos HEAF produzem um incêndio pós-evento. Assim, de acordo com a EPRI, as definições da NFPA 70E e da IEEE 1584 fornecem uma descrição mais precisa dos fenômenos físicos (HUGHES, 2017).

Nota-se que tanto na IEEE 1584, quanto na NFPA 70E, não há uma definição específica do conceito de HEAF, apesar de apresentarem as definições de arco, arco elétrico e corrente de falha de arco.

Para elucidar a questão, é importante entender que todos os HEAF se originam de arcos elétricos, mas nem todos os arcos elétricos evoluem para um HEAF. Além disso, os HEAF podem ou não incluir explosões de arco, dependendo das circunstâncias específicas do evento (NRC, 2018a).

2.2.1. CAUSA DA FALHA E EQUIPAMENTOS EM QUE O HEAF É MAIS RECORRENTE

Falhas de arcos de alta energia tem sido registrados por todo o mundo em usinas nucleares, resultando no desligamento de sistemas/componentes. Esses incidentes têm se tornado mais frequentes devido ao envelhecimento das estruturas e à demanda crescente por energia. No sistema elétrico de uma central nuclear, observou-se que os equipamentos

mais prováveis a sofrer com um evento HEAF são os transformadores, painéis elétricos de baixa (acima de 480 V até 1000V)¹, média (de 1000V até 36,2 kV)² e alta tensão (de 36,2 kV até 66 kV)², cabos, disjuntores, dutos de barramentos, barramentos segregados e isolados (HUGHES, 2017). Esses eventos ocorrem principalmente devido às más conexões físicas entre o equipamento e os barramentos, condições ambientais adversas e falhas no isolamento interno (BROWN, NOWLEN, *et al.*, 2009).

Más condições físicas incluem falhas de contato nas conexões de parafusos ou braçadeiras de contatores², interruptores e outros componentes, causadas por fatores como fadiga do material, fluxo de metal em pontos de pressão, conexões defeituosas ou sujas, corrente elevada devido à umidade, poeira, óleo e carbonização. Danos mecânicos resultantes de choques, tensão vibratória e ataques de roedores, também contribuem. A falha na manutenção é relevante, pois as falhas de contato nas conexões podem ocorrer devido à negligência humana na manutenção, como por exemplo, no reaperto das conexões. (BERG, Heinz Peter, RÖWEKAMP, 2011)

Condições ambientais que podem levar a eventos HEAF incluem terremotos, como evidenciado pelo caso de Onagawa em 2011, onde a vibração nos painéis originou o HEAF. (BERG, Heinz-Peter, FRITZE, *et al.*, 2016)

As falhas de isolamento geralmente resultam do envelhecimento (fragilidade), da introdução de corpos estranhos e de influências externas. A manutenção inadequada desempenha um papel importante nessa categoria, pois a limpeza insuficiente dos barramentos e a entrada de corpos estranhos, atuam criando caminhos alternativos para que o arco ocorra. A queda acidental ou o esquecimento de ferramentas dentro de painéis energizados também pode desencadear um arco durante a energização (BERG, Heinz Peter, RÖWEKAMP, 2011).

Em pesquisas mais recentes, de acordo com HUGHES (2017), a revisão da experiência operacional nos EUA analisou painéis de distribuição, centros de carga e barramentos, com objetivo de determinar as condições mais recorrentes de eventos acidentais, para esse fim foram considerados 32 eventos HEAF. Constatou-se que apenas

¹ Valores praticados no Brasil.

² São componentes eletromecânicos que têm como função abrir ou fechar um circuito elétrico em altas correntes.

9% dos eventos afetaram equipamentos relacionados à segurança, Classe 1E³. Enquanto 91% ocorreram em equipamentos Classe não 1E. A maioria dos HEAF (84%) aconteceu em equipamentos de média tensão, operando entre 1000 V e 35 kV, pois de acordo com EPRI/NRC-RES, (2009), em baixas tensões, por exemplo de 208 V, o arco elétrico não se sustenta. Os eventos mais graves ocorreram quando as falhas persistiram por mais de 2 segundos, geralmente devido a projetos nos quais não há um disjuntor após o gerador principal (configuração comum em diversas plantas nucleares nos EUA), o que faz com que a falha não seja isolada imediatamente, ou devido a falhas nos relés de proteção. Diversos mecanismos podem iniciar um HEAF, sendo que 65% dos eventos foram causados por falhas evitáveis, como erro humano ou manutenção inadequada. Em 66% dos casos, os danos ficaram restritos ao componente inicial.

Em resumo, os eventos HEAF são causados por uma combinação de más condições físicas, influências ambientais e falhas de isolamento, muitas vezes exacerbadas por falhas na manutenção. A prevenção desses eventos requer atenção cuidadosa à integridade das conexões, ao ambiente operacional e à manutenção regular dos equipamentos.

2.3. ACIDENTES HEAF EM INSTALAÇÕES NUCLEARES

Os acidentes nucleares variam em gravidade, desde incidentes menores com impactos limitados até catástrofes de grande escala. Entre os fatores que contribuem para esses acidentes estão falhas de equipamentos/sistemas/componentes, erros humanos, desastres naturais e, em alguns casos, problemas de projeto dos reatores. Nesta seção, serão apresentados os acidentes HEAF que ocorreram nas centrais nucleares de Onagawa, Maanshan, SONGS, Oconee e Waterford. A análise desses eventos visa entender melhor as causas e consequências dos acidentes nucleares, assim como as lições aprendidas e as melhorias implementadas para prevenir ocorrências futuras.

2.3.1. EVENTO OCORRIDO EM ONAGAWA

O terremoto de Tohoku, que ocorreu na costa do Pacífico em 11 de março de 2011, que é o mesmo terremoto do evento em Fukushima, teve uma magnitude de 9,0 (Mw) e começou às 14h46 min. Esse terremoto gerou um movimento vibratório extremo do solo

³ *classificação de segurança dos equipamentos e sistemas elétricos que são essenciais para o desligamento de emergência do reator, isolamento de contenção, resfriamento do núcleo do reator e contenção e remoção de calor do reator ou que são essenciais para evitar a liberação significativa de material radioativo no meio ambiente” (IEEE, 2020).*

e um tsunami devastador que afetou a Usina Nuclear de Onagawa, localizada a aproximadamente 125 km do epicentro. Esta instalação possui três reatores de água fervente (BWR), construídos ao longo de dezoito anos (ONAGAWA, TOKYO, *et al.*, 2012). O evento causou uma falha de arco, em dois dos dez setores não emergenciais do painel de Distribuição 1A da unidade 1 de 6900V, especificamente nos setores nº 7 e nº 8. A falha de arco resultou em um incêndio que afetou todos os dez setores do armário, que estava instalado no subsolo do prédio da turbina (KABASHIMA, KASAHARA, 2019).

O primeiro arco elétrico ocorreu sob condições normais de operação do Gabinete 7, no painel de energia não emergencial. O terremoto provocou a oscilação dos disjuntores Magne-Blast (MBBs), que estavam suspensos pelos barramentos dentro do gabinete. De acordo com TSUCHINO, KABASHIMA, *et al.* (2016) suspeita-se que um segundo arco tenha ocorrido devido a uma condição operacional anômala, no gabinete 8 do mesmo painel. Em ambos os casos, os pesados disjuntores suspensos nos gabinetes foram agitados descontroladamente, gerando arcos nos pontos de conexão entre as buchas do painel e as buchas de isolamento (ver Figura 2). Essa movimentação dos MBBs danificou os isoladores e conectores, resultando em curtos-circuitos e curtos-circuitos com a terra, que causaram o arco voltaico. O calor gerado pelo arco elétrico levou a um incêndio dentro do gabinete (NEA, 2013).

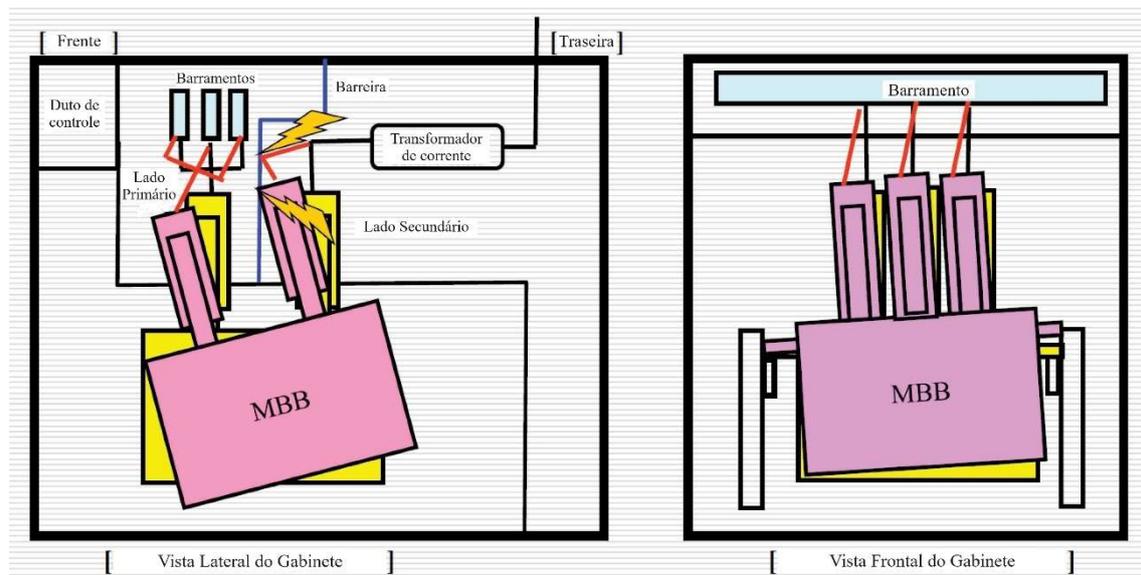


Figura 2 - Desenho simplificado do evento HEAF ocorrido em Onagawa. Adaptado de NEA (2013)

O acidente se desenvolveu com um incêndio causado pelo arco elétrico, que acionou o relé de sobrecorrente a montante do transformador de partida às 14h55 min. Isso resultou em uma perda de energia externa combinada com a comutação do sistema de alimentação e a perda do transformador auxiliar devido ao terremoto. Os barramentos de emergência foram então alimentados pelos geradores a diesel (DG-A e DG-B) (NEA, 2013). Após a perda de energia externa, que ocasionou a perda total das bombas de água de alimentação e das bombas do condensado, cuja energia era fornecida por barramentos não emergenciais. O sistema de resfriamento de isolamento do núcleo do reator, foi acionado manualmente às 14h59 min, e injetou água no vaso de pressão do reator (RPV). Porém, o condensador principal estava indisponível, visto que era suprido pelos barramentos não emergenciais, que estavam fora, então as válvulas principais de isolamento de vapor tiveram de ser fechadas manualmente às 15h02 min e a pressão do vaso de pressão do reator foi controlada manualmente, com isso o calor residual foi removido pela válvula de alívio de segurança e pelo RHR-A/C (modo de resfriamento da câmara de supressão) (KABASHIMA, KASAHARA, 2019). No entanto, o RHR-A/C foi automaticamente isolado às 15h55 min devido à subtensão instantânea no barramento de emergência C que o alimentava. Essa subtensão foi gerada pela corrente de pico no barramento de emergência para o transformador auxiliar, danificado pelo terremoto. A corrente de pico foi provocada por um curto-circuito no detector síncrono do painel de energia não emergencial devido ao incêndio. O curto-circuito gerou uma corrente espúria do painel de energia não emergencial para o painel de energia de emergência, energizando a bobina do disjuntor do barramento de emergência para o transformador auxiliar quando não devia tê-lo feito (NEA, 2013).

O modo de resfriamento da câmara de supressão foi reiniciado manualmente 16h15 min. Os operadores iniciaram a despressurização do vaso de pressão do reator abrindo manualmente a válvula de alívio de segurança, por volta das 17h10 min. Após a despressurização do vaso de pressão do reator, os operadores iniciaram as bombas de acionamento da haste de controle para injetar água no vaso de pressão do reator às 20h20 min. A planta atingiu o desligamento a frio às 0h58 do dia 12 de março (KABASHIMA, KASAHARA, 2019).

Durante o incêndio, inicialmente detectado por um sensor óptico, os bombeiros locais tiveram dificuldade em localizar o foco devido à densa fumaça. O Corpo de Bombeiros Público foi acionado às 15h41, mas não conseguiu acessar o local devido aos danos

causados pelo terremoto e tsunami. O fogo só foi extinto às 22h55, após o uso de sete cilindros de pó químico seco, totalizando cerca de sete horas de duração (KABASHIMA, KASAHARA, 2019), um dos períodos mais longos registrados no banco de dados da OECD FIRE (BERG, Heinz-Peter, FRITZE, *et al.*, 2016).

Como consequência deste evento, vários fatos podem ser destacados: O HEAF causou a perda de energia para diversos sistemas de controle e monitoramento no reator 1. No gabinete do painel de energia não emergencial, o setor onde o incêndio começou e a área adjacente foram completamente danificados por arco voltaico e fogo, conforme pode ser visto na Figura 3. Os cabos situados acima do painel de energia não emergencial foram danificados, mas outros componentes e/ou cabos não foram afetados pelo incêndio. Quando o corpo de bombeiros local acessou a sala, a porta do painel onde o incêndio começou estava aberta. Não se sabe se a abertura da porta foi causada pelo terremoto ou pela pressurização do gabinete (NEA, 2013).

Dessa forma, tem-se como lições aprendidas a importância, que o incidente ressaltou, de projetar sistemas elétricos com resiliência sísmica, capazes de suportar eventos sísmicos significativos. Para evitar falhas e incêndios de arco de alta energia induzidos por sismos, o MBB do tipo pendente no M/C, que foi a causa essencial do evento, foi substituído por outro modelo fixado no piso do gabinete. Além disso, uma alteração na filosofia de proteção elétrica se faz necessária para evitar o desarme instantâneo do barramento de emergência devido a incêndios em painéis não emergenciais, assim como para evitar correntes espúrias para painéis de emergência provenientes de painéis não emergenciais (NEA, 2013).



Figura 3 - Gabinete elétrico com o setor onde começou o incêndio e outros gabinetes prejudicados (KABASHIMA, KASAHARA, 2019).

2.3.2. EVENTO OCORRIDO EM MAANSHAN

A Usina Nuclear de Maanshan é uma planta de energia nuclear localizada nas proximidades da Baía Sul, Hengchun, condado de Pingtung, Taiwan. A planta é a terceira nuclear construída em Taiwan, e a segunda maior em capacidade de geração. Possui dois reatores de água pressurizada (PWR) Westinghouse de três circuitos, que entraram em operação comercial em 1984 e 1985. A usina foi construída seguindo os regulamentos e normas dos Estados Unidos. Em 18 de março de 2001, a Unidade 1 de Maanshan sofreu um *Station Blackout* (SBO) devido a uma falha elétrica significativa (RAUGHLEY, LANIK, 2002).

Durante a madrugada, condições climáticas sazonais provocaram depósitos de sal nos isoladores, levando a falhas intermitentes em todas as quatro linhas de transmissão de 345 kV. Devido a esses problemas, ambas as unidades nucleares (1 e 2) foram desligadas mais de 20 horas antes do evento. A energia da planta estava sendo fornecida pelos transformadores de inicialização (ST), com a fonte preferencial de 345 kV e a alternativa de 161 kV. No momento do incidente, a usina estava operando com a fonte de 161 kV, que não foi afetada pelos depósitos de sal (RAUGHLEY, LANIK, 2002).

Às 00h46 min, durante a transferência da Unidade 1 para a fonte de 345 kV, ocorreu uma falha elétrica no disjuntor do alimentador 17, que alimentava a barra essencial A de 4160 V, resultando em um incêndio. Os danos ao barramento essencial A foram extensos. O incidente causou explosões, arcos elétricos, fumaça e gases ionizados que se propagaram para o painel de 4,16 kV adjacente, danificando seis compartimentos adjacentes ao disjuntor 17, dois cubículos foram danificados em uma direção e três na outra direção. O dano causou a perda completa do barramento de segurança A e do gerador diesel de emergência (EDG-A), além da perda de energia externa (LOOP) para o barramento de segurança não danificado devido a falhas no circuito alimentador externo. Uma falha independente no EDG redundante B resultou na perda total de energia de corrente alternada (CA). A fumaça prejudicou o acesso aos equipamentos, atrasando a investigação e os reparos. O SBO foi resolvido após cerca de duas horas, quando um gerador diesel alternativo foi manualmente conectado ao barramento de segurança não danificado (RAUGHLEY, LANIK, 2002).

O evento foi um desafio significativo para os operadores, mas suas ações foram suficientes para manter a planta em condições seguras. Como a usina estava reiniciando após uma interrupção para reabastecimento e havia sido desligada quase um dia antes da perda de energia CA, o calor de decaimento foi relativamente baixo. Se a perda de energia CA tivesse ocorrido com a usina operando a 100% de potência, o calor de decaimento teria sido significativamente maior, apresentando um desafio maior para os operadores.

A probabilidade condicional estimada de dano ao núcleo, do inglês *Conditional Core Damage Probability* (CCDP), para o SBO de Maanshan foi de $2,2 \times 10^{-3}$. De acordo com o Programa NRC *Accident Sequence Program* - ASP, que fornece uma perspectiva de importância para a segurança dos eventos operacionais de usinas nucleares, considera os eventos com um CCDP maior ou igual a 10^{-4} como precursores importantes, aqueles maiores que 10^{-5} como sendo de interesse, e aqueles menores excluídos de considerações

adicionais. Este programa considerou que o SBO de Maanshan foi um precursor importante de acidente (RAUGHLEY, LANIK, 2002).

A Taiwan Power concluiu que a ressonância ferromagnética foi a causa do evento (CHOONG-KOO, 2019) e identificou uma separação elétrica insuficiente entre os barramentos de segurança A e B. Posteriormente, a companhia adicionou um intertravamento entre esses barramentos para evitar problemas futuros similares (RAUGHLEY, LANIK, 2002).

2.3.3. ACIDENTES EM SONGS, ONCONEE E WATERFORD

Os incidentes HEAF ocorridos em SONGS, Waterford e Oconee nos Estados Unidos (RAUGHLEY, LANIK, 2002), são semelhantes ao acidente ocorrido em Maanshan. Esses acidentes ocorreram após uma transferência de barramento que envolveu o disjuntor de alimentação do barramento, que permaneceu preso ou operou lentamente. A falha dos disjuntores, fabricados por diferentes empresas, descarta a possibilidade de uma falha de causa comum. Todos os incêndios aconteceram em reatores de água pressurizada, com a detecção geralmente ocorrendo em torno de um minuto. Nos eventos de Maanshan, SONGS e Waterford, a falha foi tão intensa que derreteu e vaporizou equipamentos elétricos projetados para interromper falhas de 250 a 1.000 MVA

Os incêndios foram causados por arcos elétricos de alta energia em quadros de média tensão (4,16 a 13,8 kV), tanto em sistemas de segurança quanto em sistemas não relacionados à segurança, ou em equipamentos conectados a esses quadros. Os quadros de manobra de média tensão, tanto os de segurança quanto os não relacionados à segurança, possuem projetos elétricos e mecânicos e características de construção semelhantes. Em SONGS, Waterford e Oconee, as explosões, arcos, fumaça, gases ionizados e calor gerados pelo HEAF danificaram múltiplos compartimentos do painel e causaram falhas no circuito, além da área inicial do incêndio.

O evento em SONGS, Figura 4, pode ser considerado um precursor do incidente em Maanshan. Ambos os eventos têm implicações genéricas potenciais, apesar de o incidente em Maanshan ter ocorrido em equipamentos de manobra relacionados à segurança e o de SONGS em equipamentos não relacionados à segurança, pode se dizer que o tipo de falha e a extensão dos danos foram semelhantes. Ressalta-se inclusive que estes dois acidentes levaram a NRC a iniciar uma investigação dos eventos HEAF em 2001 (BROWN, NOWLEN, *et al.*, 2009).

Em Waterford e Oconee, o incêndio nos compartimentos dos painéis queimou cabos aéreos. Especificamente em Waterford, o fogo na bandeja de cabos ultrapassou uma barreira corta-fogo vertical, sendo contido apenas por uma barreira corta-fogo horizontal (RAUGHLEY, LANIK, 2002).

Esses eventos indicam que eventos HEAF liberam grandes quantidades de energia instantaneamente, de modo a contornar os estágios de iniciação e crescimento do fogo contido nos modelos tradicionais de risco de incêndio.



Figura 4 - HEAF em SONGS 2001 (RAUGHLEY, LANIK, 2002).

2.4. A CNEN E O DESAFIO REGULATÓRIO FRENTE AOS RISCOS DE HEAF

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) tem como uma de suas atribuições a responsabilidade de licenciar e fiscalizar a produção e a utilização da energia nuclear no Brasil (CNEN, 2021b). Seu papel é central na garantia da segurança das operações nucleares, assegurando que as práticas e instalações sejam conduzidas de forma a proteger a saúde humana, o meio ambiente e os interesses do país. Atualmente a CNEN não possui uma norma que trate dos eventos HEAF em plantas nucleares.

A ausência de regulamentações relacionadas ao HEAF ressalta um desafio para o cenário brasileiro, uma vez que tais eventos podem representar riscos catastróficos para sistemas elétricos e de comprometer a integridade de reatores nucleares. Para lidar com essa lacuna, torna-se fundamental que a CNEN considere a adoção de experiências e normativas internacionais, visando à expansão do arcabouço regulatório brasileiro.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo inicialmente foi feito uma análise bibliométrica para levantamento das normas/regulamentos que tratam do evento HEAF.

3.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica é um método de pesquisa que visa medir quantitativamente as publicações científicas de um autor ou de uma Instituição de Ensino Superior em periódicos acadêmicos com revisão por pares (SOUZA, RIBEIRO, 2013), utilizando para isso, parâmetros e metodologia matemáticas e estatísticas (FRANCISCO, 2011), apresentando, dessa forma, suas conclusões de modo a delinear previsões e sustentar tomadas de decisões (DE BORBA, HOELTGEBAUM, *et al.*, 2011).

Diante disso, neste capítulo, será apresentado as etapas da metodologia utilizada para a seleção das referências bibliográficas utilizadas no presente trabalho.

A investigação e a análise deste estudo foram realizadas a partir da busca principalmente nas bases de dados da *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct*, *Research Rabbit* e Google. A Tabela 1 apresenta todas as informações coletadas, as bases de dados onde a busca foi realizada, os filtros utilizados e o conjunto de metadados selecionados.

Tabela 1 - Bases utilizadas na busca

Base de Dados	<i>Scopus;</i> <i>Web of Science;</i> <i>Science direct;</i> <i>Research Rabbit;</i> Google (google scholar e google).
Filtros	Área de conhecimento; Tipos de publicações; Período de tempo, etc. Parsif.al (para agrupar, selecionar os resultados e excluir as duplicatas); Zotero para criação de uma biblioteca única; A visualização dos resultados foi feita utilizando os dados brutos refinados com o pacote de software VOSviewer (Van Eck & Waltman, 2021).:
Conjunto de metadados	Resumos; Autores; Instituições; Número de citações; Referências citadas; Título do periódico, DOI (quando disponível); Língua do documento original; Ano da publicação; Palavra-chave do autor; Referências.

3.1.1. PROCEDIMENTO DE BUSCA

A pesquisa dividiu-se em 9 etapas apresentadas a seguir, as 5 primeiras etapas foram repetidas para cada base de dados (*Scopus*, *Web of Science*, *Science direct*, *Research Rabbi*, *Google scholar* e *Google*):

- *Scopus*

A 1ª **Etapa** da análise bibliométrica caracterizou-se pela busca por palavras-chave nas bases de dados. Para a busca inicial na página do *Scopus* utilizou-se as palavras-chave: *High energy arcing fault*, sem aspas ou operadores. Foram encontrados 2156 documentos.

A 2ª **Etapa** consistiu na tentativa de limitar os resultados encontrados, pois após as primeiras buscas verificou-se uma infinidade de material encontrado que não estava relacionado com o tema. Então buscou-se otimizar o escopo da pesquisa, para isso acrescentou-se operadores booleanos, utilizou-se palavras-chave de forma cruzada, entre

aspas (“”) e acrescentou-se a palavra-chave HEAF. No resultado obtido, após as modificações feitas, observou-se grande incidência de trabalhos sobre o sistema fotovoltaico, mais especificamente sobre arco elétrico seguido de incêndio nesses sistemas, e isto decorre do fato de que esta forma de aproveitamento da energia solar para geração de eletricidade vem sendo amplamente empregada nos últimos anos (SPELLMEIER, RIGO, *et al.*, 2020). Dessa forma, foi observado que com a crescente utilização desse sistema, cresceram também, os acidentes ocasionados pelo arco elétrico. Entretanto, como esse não é o foco desta pesquisa foram utilizados operadores booleanos com as palavras-chave que remetem a esse sistema, de forma a excluir esses trabalhos da busca principal. Após os passos descritos anteriormente, a busca retornou 115 artigos.

Na 3ª **Etapa** buscou-se limitar a janela temporal, especificamente, sobre o assunto HEAF, que é um tema relativamente recente e no qual existem poucas publicações. Decidiu-se então, restringir as publicações a partir do ano 2000, limitando-se a busca ao intervalo de 24 anos. Foram então encontrados 94 documentos, conforme *string* de busca mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – *String* de busca utilizadas nas principais bases de dados

Base de Dados	<i>String</i> de Busca utilizada
Scopus	(ALL ("high energy" AND "arcing fault" OR heaf) AND NOT ALL ("photovoltaic" OR "DC" OR "microgrid") AND NOT TITLE-ABS-KEY (high AND impedance OR hif)) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2024.
Science Direct	("high energy" AND "arcing fault" AND FIRE) NOT (DC OR photovoltaic OR microgrid OR wind turbine power)
Web of Science	(ALL= (("high energy" AND arc* fault* AND fire) NOT (DC OR photovoltaic OR automotive vehicles OR lithium-ion)))

A 4ª **Etapa** trata-se de um “ajuste fino”, ou seja, foi excluído tudo que não tivesse relação com as palavras Engenharia, Física, Eletricidade e Nuclear, pois examinado os artigos, notou-se que ainda havia muitos documentos que fugiam ao tema da pesquisa. Para realizar essa seleção, examinando a seção chamada “*subject area*” foram retirados os seguintes assuntos: “*Medicine, Nursing, Chemistry, Pharmacology, Agricultural, social sciences, Decision sciences, Biochemistry, Neuroscience, Environmental Science, Earth end Planetary Science, Dentistry, Business, management and accounting, Chemistry Engineering*”. Após esse corte restaram 31 documentos.

A 5ª **Etapa** consiste em selecionar o idioma em que o documento é apresentado. Foram selecionados apenas documentos em inglês, visto que não foram encontrados documentos em português e espanhol. Dessa forma restaram 29 documentos na busca principal, como pode ser visto no anexo I.

Conforme dito anteriormente, as etapas de 1 a 5 foram repetidas para as outras bases de dados.

- *Science Direct*

Na 1ª Etapa, na página do *Science direct*, ao realizar a busca da palavra-chave *High Energy Arcing Fault*. Foram encontrados 36.061 resultados.

Na 2ª **Etapa** foram seguidos os mesmos passos descritos anteriormente para limitar o número de artigos. A única diferença com relação a busca no *Scopus*, é que na página da Science direct acrescentar a palavra-chave HEAF precedida do operador booleano “AND” limitou a 6 artigos encontrados e alterando-se o operador booleano para “OR” ampliou-se a busca para 2520 resultados, optou-se então por suprimir a palavra-chave “HEAF” e ela foi substituída por “FIRE”, precedido pelo operador “AND”, conforme pode ser visto na *string* de busca na Tabela 2. Com isso o resultado encontrado foi de 49 artigos. No entanto, para completar esta etapa é necessário retirar as palavras-chave que remetam ao sistema fotovoltaico. Foram encontrados, após esses passos 14 artigos.

Na 3ª **Etapa** usou-se o mesmo intervalo de 24 anos, e foram encontrados 10 artigos.

Na 4ª **Etapa** retirou-se assuntos como medicina e geologia que não têm relação com o tema e restaram apenas 8 artigos, como pode ser visto no anexo II.

A 5ª **Etapa** não foi utilizada, pois os artigos remanescentes estavam todos em inglês.

- *Web of Science*

Na 1ª Etapa, na plataforma da *Web of Science*. A busca foi realizada conforme feito anteriormente, e dessa maneira foram encontrados 1092 artigos.

Na 2ª Etapa procedeu-se de forma semelhante ao descrito anteriormente. Porém na *Web of Science* não houve necessidade outros refinamentos, ou seja, só foram usados os operadores booleanos e termos estre aspas (“”) e ao final foram encontrados apenas 12 artigos, como pode ser visto no anexo III.

Não houve necessidade de utilizar-se as 3ª, 4ª e 5ª Etapas, pois os artigos encontrados já atendiam as diretrizes desses passos. A *string* de busca utilizada encontra-se na Tabela 2.

A *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*, foram consideradas como as principais bases de dados de artigos científicos pela quantidade de artigos encontrados e pela facilidade de exportação dos metadados da pesquisa que podem ser salvos em diversos formatos, inclusive RIS, .txt, csv., para que fossem criados os gráficos para visualização.

3.1.2. PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS

Nesta seção agrupamos o google, o google acadêmico e o *Research Rabbit*, pois essas bases funcionam de maneira diversa, das bases citadas anteriormente.

- Google

O google e o google acadêmico foram usados, porém não como os 3 anteriormente citados, pois o processo de busca é bastante diverso. Na busca avançada do google acadêmico, por exemplo, não funcionou utilizar uma *string* de busca, com nas etapas anteriores, no entanto foram utilizadas parte da 2ª Etapa, pois há um campo “sem as palavras” que funciona como o operador “*NOT*” ou “*AND NOT*” dependendo do site e a 3ª Etapa de limitar o período-

Após o procedimento descrito, é mostrado na Figura 5 o processo de busca avançada deste site, constatou-se que retornaram informações valiosas sobre o tema, porém é bastante trabalhoso retirar os dados bibliográficos deste site, então o procedimento feito para obter informação não foi como os descritos acima.

The image shows a screenshot of the Google Scholar advanced search interface. It features several search options and filters:

- Encontrar artigos** (Find articles):
 - com todas as palavras (with all words): An empty text input field.
 - com a frase exata (with the exact phrase): A text input field containing "high energy arcing fault".
 - com no mínimo uma das palavras (with at least one of the words): An empty text input field.
 - sem as palavras (without the words): A text input field containing "DC Photovoltaic microgrid wind turbine lithiur".
- onde minhas palavras ocorrem** (where my words occur): Two radio button options:
 - em qualquer lugar do artigo (anywhere in the article)
 - no título do artigo (in the article title)
- Exibir artigos de autoria de** (Show articles by author): A text input field with examples: "Guilherme Bittencourt" ou McCarthy.
- Exibir artigos publicados em** (Show articles published in): A text input field with examples: Saber Eletrônica ou Revista Ciência Hoje.
- Exibir artigos com data entre** (Show articles with date between): Two date input fields, one containing "2000" and the other "2024", separated by a minus sign. Below them is an example: "Exemplo: 1996".

Figura 5 - *print* da busca avançada do Google Acadêmico.

Na busca avançada do Google acadêmico foram encontrados 42 artigos. No entanto para conseguir os dados bibliográficos foi preciso acessar publicação por publicação. Selecionou-se então neste site apenas 13 artigos não encontrados em nenhuma das bases de dados anteriormente mencionadas. Como pode ser visto no anexo IV.

- *Research Rabbit*

A última base de dados acessada foi o *Research Rabbit*. Tal como o google, não será estabelecido as 5 etapas anteriores, visto que este site tem funcionamento bastante diverso dos anteriores, conforme será explicado adiante.

O *Research Rabbit* é uma ferramenta gratuita que utiliza inteligência artificial na pesquisa acadêmica, facilitando busca de artigos da mesma temática. Neste aplicativo, não se usa *string* de busca, para se executar uma pesquisa é executada inserindo apenas um artigo que trata exatamente do tema buscado, e sem ter que executar qualquer comando, a inteligência artificial faz a busca. O resultado da busca trouxe basicamente os mesmos artigos encontrados nos outros buscadores, 13 artigos relacionados com o tema foram encontrados, como pode ser visto no anexo V. No entanto, este se mostrou útil ao encontrar um único artigo que nenhuma das bases indicadas anteriormente encontrou, e que se mostrou bastante importante, pois trata-se de um artigo de review (BROWN, NOWLEN, *et al.*, 2009), que reúne vasto conteúdo de pesquisas sobre o tema até a data da sua publicação em 2008.

Após a etapa de coleta de dados, para facilitar a realização da revisão de literatura, este estudo empregou o *software* online Parsifal (FREITAS, 2014). O Parsifal é uma ferramenta digital gratuita desenvolvida para auxiliar pesquisadores na condução de revisões sistemáticas da literatura, fornecendo uma estrutura organizada de etapas. A escolha deste *software* para a condução do presente estudo se baseou na sua capacidade de fornecer um arcabouço abrangente para o planejamento, execução e organização dos dados, conferindo maior rigor metodológico ao processo de revisão.

3.1.3. COLETA E TRATAMENTO INICIAL DOS DADOS

Inicia-se, a partir deste ponto a 6ª **Etapa**, que trata da coleta e tratamento inicial de dados. Todos os artigos encontrados nas bases de dados utilizadas - *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct*, *Research Rabbit* e Google - foram carregados para o Parsifal. Este software identifica automaticamente os artigos duplicados.

Em seguida, na 7ª **Etapa**, análise de dados, recorre-se a um processo de filtragem dos artigos de acordo com as perguntas elaboradas pelo usuário, com o intuito de selecionar os documentos mais pertinentes à pesquisa.

Esta etapa de avaliação foi realizada após a leitura do resumo de todos os arquivos inseridos no Parsifal, de acordo com os pontos de interesse do tema em estudo, foram adotados critérios para qualificar ou desqualificar artigos. Esses critérios foram:

- i. Critério de Inclusão:
 - Estudos que falem sobre HEAF em plantas nucleares;
 - Estudos que tratem de eventos combinados que envolvam HEAF;
 - Estudos que tratem do arco elétrico, do incêndio subsequente e da segurança nas instalações industriais e nucleares;
- ii. Critério de Exclusão:
 - Estudos com acesso fechado;
 - Documentos que não sejam artigos, normas ou relatórios
 - Estudo fora do escopo (estudos voltados para relés de proteção, e outros assuntos que não envolvam especificamente o HEAF);
 - Artigos com 4 páginas ou menos.

Com a primeira triagem realizada ao aplicar a metodologia descrita no item acima, seguiu-se para 8ª **Etapa** que consiste em realizar uma análise detalhada de todos os artigos selecionados, e após a leitura completa de cada artigo, foi realizada uma nova seleção, baseada em uma lista de verificação de avaliação de qualidade, usando o Parsifal, o qual verificou a relevância dos artigos baseado nas seguintes premissas:

- Os autores descrevem as limitações dos estudos?
- O estudo identifica normas e leis que tratam do HEAF de forma clara?
- O Objetivo da pesquisa está claramente descrito?
- O estudo identifica acidentes anteriores e avalia os fatores que contribuíram para ocorrência do evento?
- O estudo trata do evento HEAF e não somente do arco elétrico, e o incêndio subsequente é mencionado?

Todas as premissas anteriores foram respondidas para cada artigo que passaram pela primeira etapa de triagem, e receberam notas conforme apresentado na Tabela 3, de forma que, a maior nota possível é cinco e a menor zero. Decidiu-se rejeitar todos os artigos que tivessem nota menor ou igual a 2,5, por assumir que estes não atendiam o mínimo das premissas.

Tabela 3 – Notas atribuídas a cada resposta

Respostas	Notas
SIM	1,0
PARCIALMENTE	0,5
NÃO	0

3.1.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A 9ª **Etapa** destinou-se à análise e interpretação dos dados coletados. No total, 75 documentos foram importados para o software Parsifal, oriundos das seguintes plataformas: Google Acadêmico (13), Web of Science (12), Research Rabbit (13), Science Direct (8) e Scopus (29). A Figura 6 ilustra a distribuição dos documentos por base de dados. É relevante mencionar que 18 artigos foram identificados como duplicados e, conseqüentemente, desconsiderados na análise.

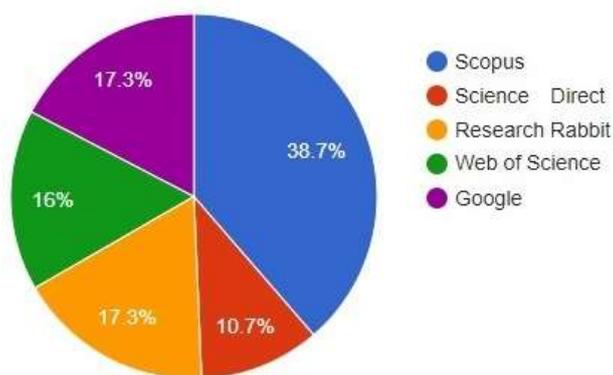


Figura 6 - Artigos por fonte.

Após as duas triagens, mencionada anteriormente, foram rejeitados 31 documentos, pelos critérios acima mencionados, restando apenas 26 documentos (Anexo VI), que foram considerados a base de dados desta dissertação, no entanto, deve ser pontuado aqui que diversos documentos muito importantes para esta pesquisa não estão nesta seleção, pois tratava-se de normas e relatórios técnicos.

Ainda na 9ª etapa, foi realizada a análise dos 26 documentos selecionados, com a ajuda do pacote VOSviewer (Van Eck & Waltman, 2009), como pode ser visto no anexo VI, para a construção dos mapas a serem utilizados na etapa bibliométrica. No entanto, esta biblioteca é composta de documentos de bases de dados diferentes, foi, portanto, necessário empregar um software capaz de efetuar a importação dos dados dos documentos e convertê-los em um formato que possa ser lido pelo VOSviewer. Com este propósito utilizou-se o *software* Zotero, que é um programa gratuito, que elabora e gerencia citações e referências de maneira automática (IBICT, 2022), o qual criou uma biblioteca no formato RIS que é suportado pelo VOSviewer, sendo então possível fazer a análise desta rede específica.

É importante ressaltar que o VOSviewer possui limitações quanto aos tipos de mapas que podem ser gerados a partir de arquivos no formato RIS. No caso específico, apenas os mapas de coautoria e palavras-chave foram viáveis. Para a criação de mapas de países, afiliações e outros, é necessário importar metadados de bases de dados semelhantes no formato .txt ou .csv. Por esse motivo, foram realizadas análises separadas para as bases de dados do *Scopus* e da *Web of Science*. Por último, será apresentada a análise integrada da biblioteca no formato RIS.

3.2. ANÁLISE DO VOSVIEWER PARA O SCOPUS

Conforme mencionado anteriormente, foi analisada a rede encontrada para todos os arquivos resultantes na página da *Scopus*, ou seja, os 29 documentos. (Anexo I)

3.2.1. REDE DE COAUTORIA

Quando são exportados dados de uma base de dados, neste caso a *Scopus*, e eles são importados para o VOSviewer, a ferramenta gera um grafo que representa as relações entre os autores.

Cada nó no grafo representa um autor. O tamanho do nó pode indicar diferentes métricas, como o número de publicações do autor ou o número de vezes que ele foi citado. As conexões entre os nós indicam colaborações entre os autores. Quanto mais forte a conexão (ou seja, mais espessa a linha), mais colaborações existem entre esses autores.

Deve-se ressaltar também os *clusters* formados, ou seja, o VOSviewer agrupa automaticamente autores com base em suas colaborações. Esses grupos, ou *clusters*, são visualmente distintos no grafo. Autores dentro do mesmo *cluster* geralmente têm uma forte colaboração entre si.

Observando o grafo fornecido pelo programa, Figura 7, pode-se notar algumas particularidades, observa-se o grupo bem distinto de pesquisadores, ocidentais e orientais. Os ocidentais foram os primeiros a tratar do tema HEAF, o que pode ser observado de acordo com a cor dos *clusters*. Notou-se que pesquisadores orientais, em tons verdes seguindo para os amarelos, que indicam as publicações mais recentes, em sua maioria não citam os trabalhos dos pesquisadores ocidentais que os precederam.

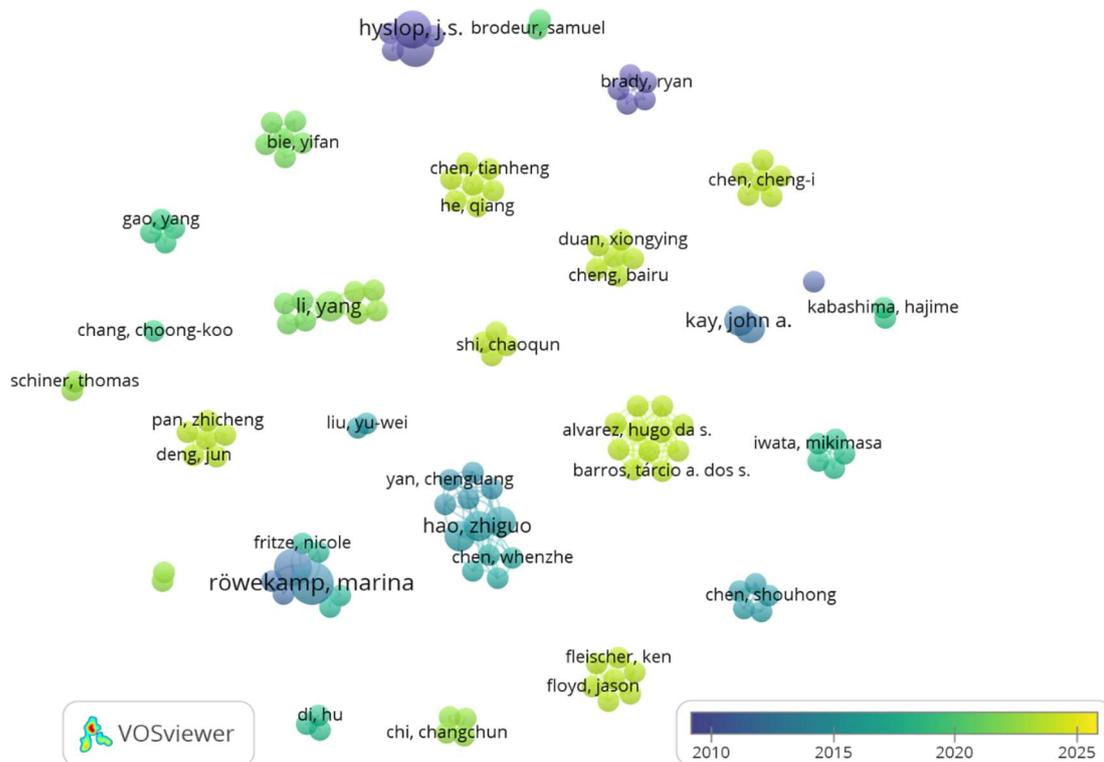


Figura 7- Autores que publicaram sobre o tema (*High Energy Arcing Fault*) isoladamente e em conjunto.

3.2.2. REDE DE COAUTORIA POR PAÍSES

Foi feita uma análise de coautoria por países, em que cada nó no grafo representa um país. O tamanho do nó pode indicar diferentes métricas, como o número de publicações ou o número de colaborações com outros países. Pode-se ressaltar também que as conexões entre os nós indicam colaborações entre os países.

A análise elaborada pela ferramenta, revela quais países com maior número de publicações, assim como, os que tem maior relevância para o assunto. Destaca-se, neste caso, a China, pelo tamanho do círculo, em comparação com os outros países. Para melhor investigação aplicou-se zoom na região onde se encontra a China, sendo assim possível observar as ligações com os outros países. Na Figura 8, no lado direito é mostrado todos os países com publicação sobre o tema e no lado esquerdo destaca-se zoom para as ligações entre os países China, Alemanha, Espanha, Estados Unidos e França.



Figura 8- Rede de coautoria por países, lado direito com China em destaque.

3.3. ANÁLISE DO VOSVIEWER PARA O *WEB OF SCIENCE*

Conforme mencionado anteriormente, foi analisada a rede encontrada para todos os arquivos resultantes da busca na página da *Web of Science*, ou seja, 12 documentos. Observa-se que foi feita a análise para uma quantidade menor de artigos.

3.3.1. REDE DE COAUTORIA

Como já foi feita uma breve explicação sobre cada rede, apenas apresentaremos as figuras encontradas a cada análise elaborada. Será comentado caso seja observada alguma diferença entre as figuras, ou alguma particularidade, no entanto, espera-se que não haja grandes variações, apesar de os documentos pertencerem a bases de dados diferentes e pela quantidade de documentos diferentes.

A rede de coautoria, mostrada na Figura 9, é semelhante a rede construída para a base do *Scopus*, conforme mostrado na Figura 7.

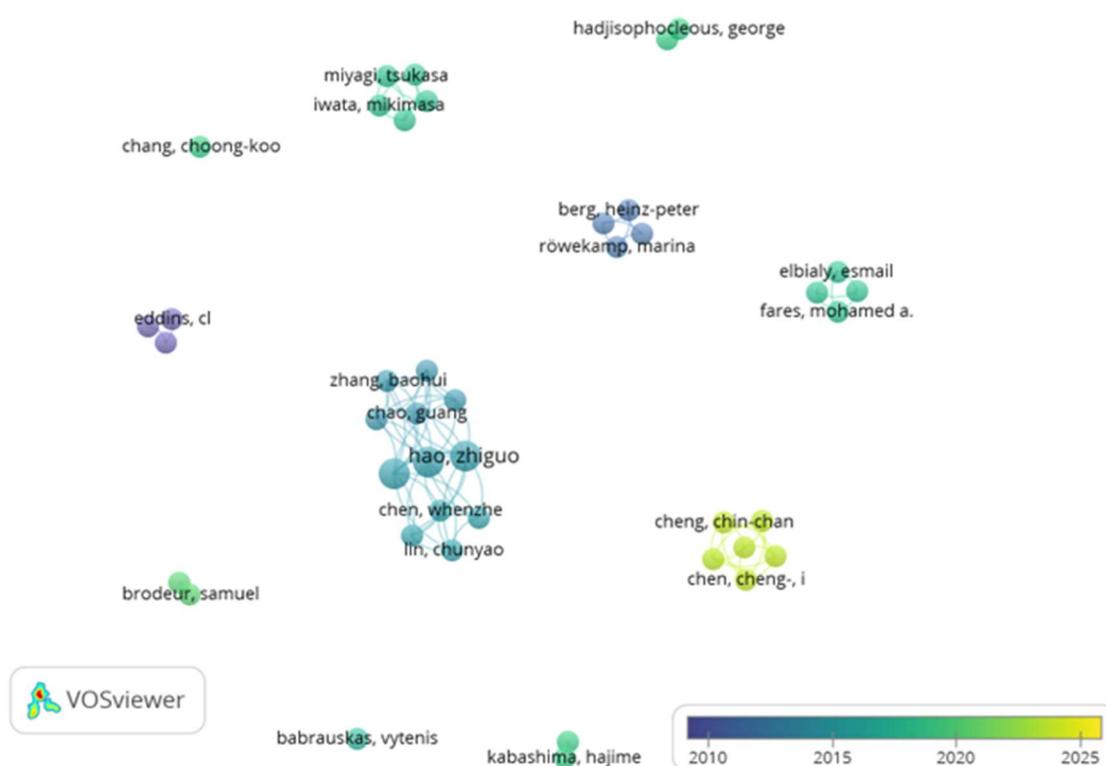


Figura 9- WOS: Autores que publicaram sobre o tema (*High Energy Arcing Fault*) isoladamente e em conjunto.

3.3.2. REDE DE COAUTORIA POR PAÍSES

A rede desenhada com a base de dados fornecida pela *Web of Science* é pouco diferente da rede que foi apresentada para a *Scopus*, apresentando apenas alguns países que não apareceram antes, como por exemplo, o Egito, ver Figura 10.

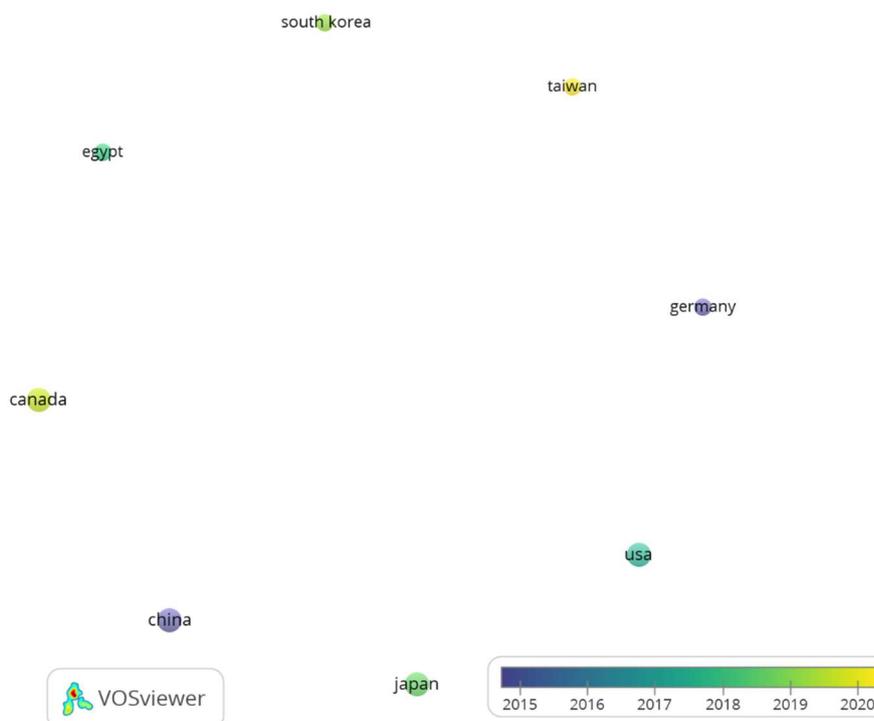


Figura 10 – WOS: Rede de coautoria por países.

3.3.3. REDE DE CITAÇÃO POR AUTORES

Para a elaboração das redes no WOS procurou-se usar os mesmos parâmetros usados na elaboração da rede do *Scopus*, ou seja, para elaboração desta rede deveriam ser selecionados os autores com pelo menos dois documentos publicados no tema em pauta, no entanto, observou-se apenas 3 autores, que não tem relevância para o tema “HEAF”, mas que têm publicações relacionadas ao arco elétrico. Então neste caso utilizou-se todos os autores que publicaram pelo menos um artigo sobre o tema estudado, visto que a quantidade de artigos analisada foi menor. O grafo resultante pode ser visto na Figura 11.



Figura 11 - WOS: Rede de citação por autor.

Como ocorreu na rede elaborada para a *Scopus*, observou-se que não houve ligações entre os autores, cujos motivos podem estar relacionados com os motivos expostos anteriormente.

3.4. ANÁLISE DO VOSVIEWER PARA A BIBLIOTECA UNIFICADA

Neste item será apresentada a análise integrada da biblioteca, formada pelos arquivos que foram aceitos da base de dados do *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct*, *Research Rabbit* e *Google*, foi utilizado o *Zotero* para agrupar e criar a biblioteca única. Como mencionado anteriormente somente a rede de coautoria e palavras-chave é possível ser formada a partir de arquivos no formato *RIS*, formato fornecido pelo *Zotero* e que é suportado pelo *VOSviewer*. Deveriam fazer parte desta rede 26 documentos, no entanto alguns documentos não possuíam Identificador de Objeto Digital (*Digital Object Identifier – DOI*), como por exemplo, documentos elaborados pela *NRC*. Portanto, dos 26 documentos selecionados, 7 não foram possíveis de inserir na rede analisada pelo *VOSviewer*. Isto posto, será analisada a rede composta por 19 documentos considerados relevantes para o tema em estudo.

3.4.1. REDE DE COAUTORIA

A rede de coautoria para a biblioteca de artigos selecionados foi mapeada pela ferramenta VOSviewer e é apresentada na Figura 12.

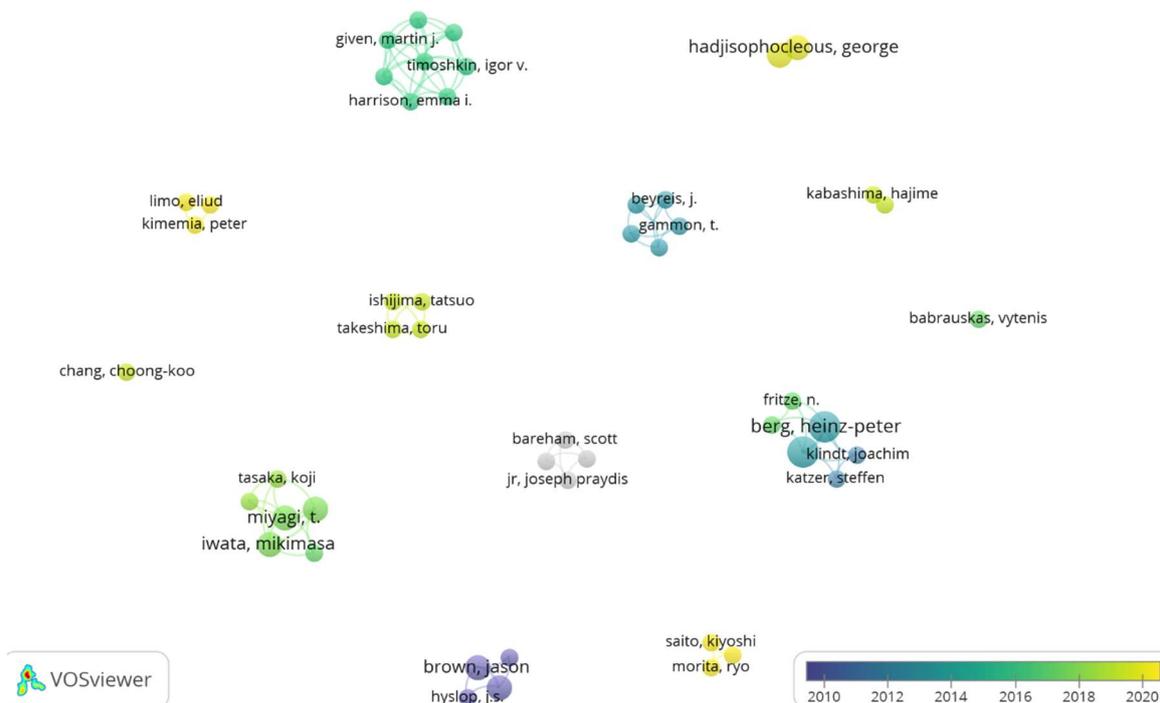


Figura 12 - Mapa de coautoria da biblioteca única.

Pode-se observar a semelhança entre as redes apresentadas anteriormente comparando-se a Figura 12 com a Figura 7 e Figura 9.

3.4.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 13 expõe para os 26 artigos finais a proporção por base de dados de quantos trabalhos foram rejeitados e quantos foram aceitos, no entanto, o gráfico não é adequado quando trata do google, visto que como não foi possível exportar a base de dados do google scholar, realizou-se o processo inverso, ou seja, após a busca, selecionou-se e efetuou-se a leitura de artigo por artigo antes de importar para a base de dados. Portanto só foram importados os artigos que tinham relevância para o tema.

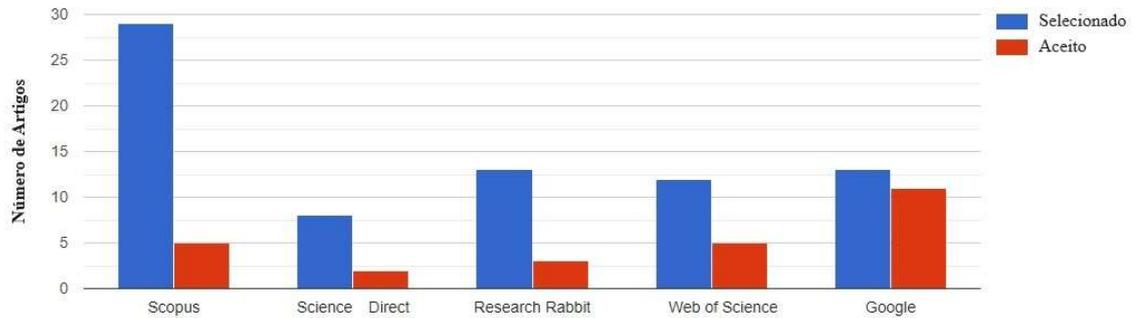


Figura 13 - Artigos aceitos após triagem.

Ainda, com relação aos 26 artigos finais, pode-se observar na Figura 14, a quantidade de artigos publicados por ano. O pico observado no ano de 2013, pode ter relação com relatório da OECD, *OECD Fire Project – Topical Report No. 1* (NEA, 2013), relatório que abrange os 34 países membros da OECD e pelo acidente HEAF que ocorreu em Onagawa no Japão, em 2011, que gerou grande repercussão. O maior pico que ocorre por volta do ano de 2019, pode estar relacionado com o fim da fase 1 e início da fase 2, no qual testes experimentais foram realizados para melhor caracterizar os fenômenos HEAF (NEA, 2017, TSUCHINO, KABASHIMA, *et al.*, 2016). As fases 1 e 2 foram descritas nos itens 4.1.8 e 4.1.15.

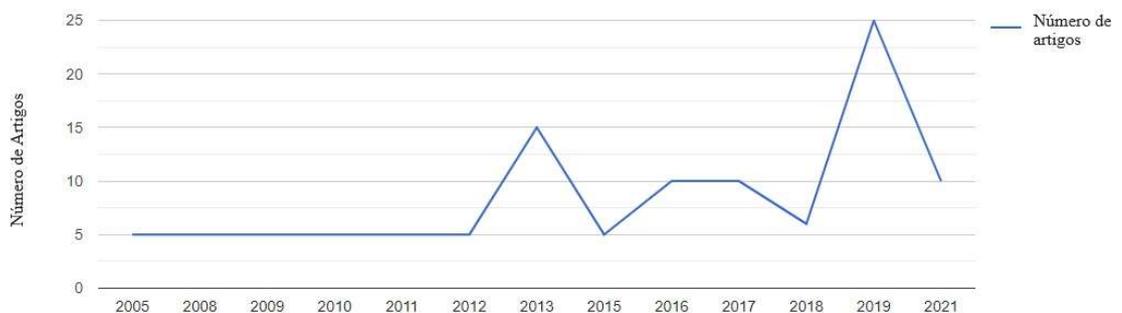


Figura 14 - Número de artigos publicados por ano.

Ao longo da análise dos mapas fornecidos pela ferramenta VOSviewer, chamou atenção a ausência de conexão entre os autores que discutem a temática em pauta. A partir da análise dos artigos e da observação das redes formadas, concluiu-se que o tema HEAF é extremamente específico e especializado, resultando em um número limitado de pesquisadores dedicados diretamente a essa área. Embora HEAF e arcos elétricos compartilhem a característica de iniciarem com um arco elétrico, eles não são idênticos.

A principal diferença entre eles reside na duração da descarga antes de ser extinta. Arcos elétricos convencionais se extinguem rapidamente, geralmente em alguns ciclos elétricos ou frações de segundo. Por outro lado, HEAF são arcos que persistem por períodos mais longos (NRC, 2018a). Embora não exista um limite preciso, o termo HEAF geralmente refere-se a falhas de arco que duram dois segundos ou mais. A Figura 15 explica a diferença entre HEAF e arco elétrico, mostrando o HEAF como um subconjunto do arco elétrico, com base nas explicações fornecidas.

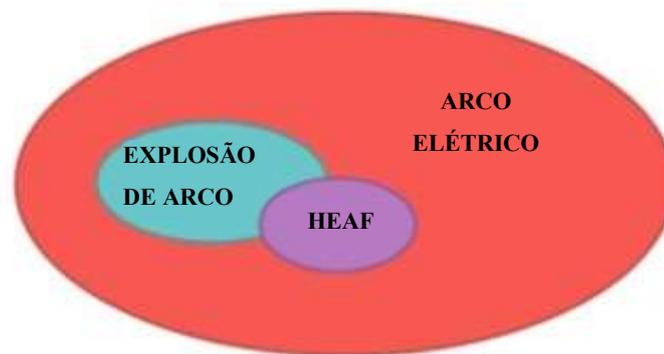


Figura 15 - Relação entre HEAF e Arco Elétrico - figura adaptada de NRC (2018a).

Ao analisar os artigos encontrados nas bases de dados citadas, ficou evidente que todos abordam, de alguma forma, os fenômenos dos arcos elétricos. Contudo, a maioria dos estudos focava na proteção de sistemas elétricos de potência, abordando temas variados sobre relés de proteção. Outros estudos centravam-se na determinação dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) para trabalhadores e na definição de distâncias seguras de trabalho. Estes são tópicos relevantes para a mitigação dos efeitos dos arcos elétricos. No entanto, este trabalho foca especificamente em eventos ocorridos em plantas industriais, com ênfase especial em usinas nucleares, devido ao potencial desses acidentes desafiarem a segurança das instalações.

4. INVESTIGAÇÃO DOS DOCUMENTOS ENCONTRADOS PELA ANÁLISE BIBLIOMETRICA

A presente seção dedica-se à apresentação e estudo dos documentos encontrados na análise bibliométrica. A investigação do HEAF tem se mostrado de grande importância para garantir a segurança e eficiência dos sistemas elétricos de centrais nucleares. Esta revisão traça um panorama da evolução do conhecimento sobre o tema, desde os primeiros estudos sobre os fenômenos físicos até as normas regulatórias e pesquisas acadêmicas mais recentes.

4.1. INICIATIVAS DE PESQUISAS NOS ANOS 2000

Por volta dos anos 2000, a NRC começou uma parceria internacional com o objetivo de aprofundar o entendimento sobre os fenômenos HEAF e aprimorar os métodos existentes da avaliação probabilística de risco (APR) de incêndio. Essa colaboração foi viabilizada pela Agência de Energia Nuclear (NEA) da OECD, da qual a NRC é integrante. (TAYLOR, G, HAMBURGER, *et al.*, 2019)

4.1.2. EPRI 1011989/NUREG/CR-6850

Eventos HEAF ocorreram em diversos países e têm sido um ponto focal no desenvolvimento da APR contra incêndios. Em resposta a essa necessidade, foi conduzido um estudo conjunto entre o Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica (*Electric Power Research Institute* - EPRI) e o Escritório de Pesquisa Regulatória Nuclear (*Office of Nuclear Regulatory Research* - RES) da NRC, sob os termos de um Memorando de Entendimento entre NRC e EPRI. O resultado desse esforço é documentado na publicação EPRI 1011989/NUREG/CR-6850 de setembro de 2000, que apresenta métodos, ferramentas e dados para a realização de uma APR de incêndio em uma usina nuclear comercial. É notável que este grupo de trabalho foi pioneiro ao modelar explicitamente eventos HEAF como parte de uma APR de incêndio (TAYLOR, Gabriel, 2019).

Os eventos HEAF são descritos no volume 2, apêndice M da NUREG/CR-6850 (NRC, 2005), publicado em 2005. Embora o fenômeno já fosse conhecido, a compreensão do HEAF em painéis e centros de carga era bastante limitada naquela época. Posteriormente, o entendimento foi ampliado para incluir barramentos e dutos de barras,

conforme descrito na FAQ 07-0035, publicada no Suplemento 1 da NUREG/CR-6850 (NRC, 2009).

O Método de Zona de Influência (*Zone of Influence - ZOI*) foi desenvolvido principalmente a partir de um evento catastrófico com muitas evidências que ocorreu na Estação Geradora Nuclear de San Onofre (*San Onofre Nuclear Generating Station - SONGS*) (BROWN, NOWLEN, *et al.*, 2009), Unidade 3, em 3 de fevereiro de 2001, envolvendo um conjunto de manobra de média tensão. A ZOI é definida na NUREG/CR-6850 (NRC, 2005) como a área ao redor de uma fonte de ignição onde todos os combustíveis e elementos podem ser danificados por um incêndio desencadeado por essa fonte, para efeitos da avaliação probabilística de risco. As dimensões específicas da ZOI, conforme informado pela NUREG/CR-6850, são de 0,9 m na horizontal e 1,5 m na vertical. Conforme pode ser visto na Figura 16. A zona de influência para barramentos isolados por fase é definida por uma esfera centrada no ponto de falha e medindo 1,5 m de raio. Para HEAF dentro de dutos de barramentos não isolados será considerado um cone que se expande para baixo a partir do ponto de arco, encerrando um ângulo sólido total de 30°, até um diâmetro máximo de 6,0 m e uma esfera com raio de 0,45 m a partir do ponto de arco, em que o metal fundido se espalha para baixo.

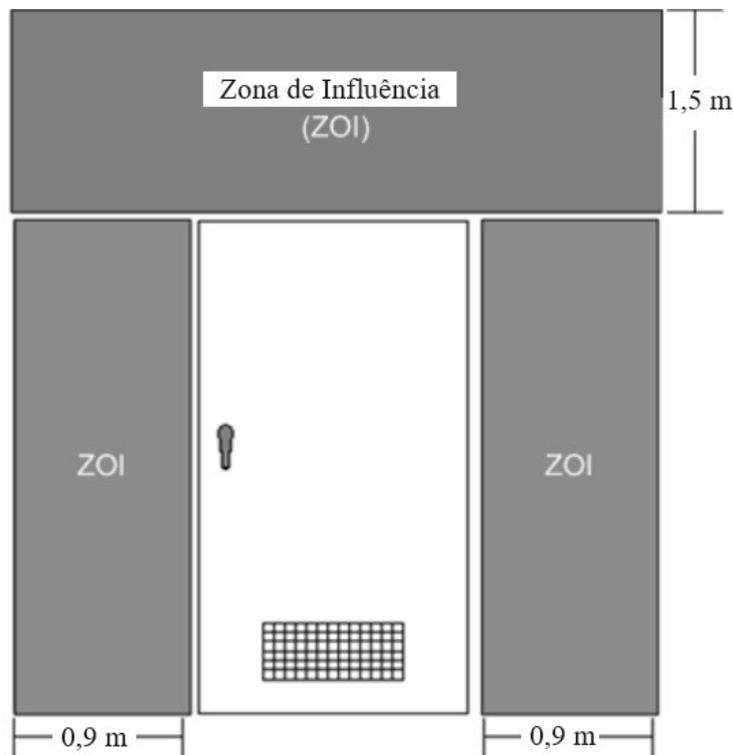


Figura 16 - ZOI conforme NUREG/CR-6850, adaptado de (TAYLOR, Gabriel, 2019)

A NUREG/CR-6850 introduziu uma gama de frequências de ignição para diversos tipos de incêndio elétricos. A frequência de ignição é uma métrica essencial para avaliar o risco de incêndio e refere-se à probabilidade de ocorrência de um incêndio por unidade de tempo, sendo fundamental para determinar a segurança de uma instalação nuclear. É importante destacar que este é o primeiro documento a apresentar uma frequência de incêndio para eventos HEAF. As frequências de ignição referentes aos incêndios HEAF serão tratadas no item 4.5.2.

Os incêndios HEAF se destacam de incêndios elétricos comuns pela rápida velocidade que se desenvolvem, por isso a necessidade de uma frequência de ignição diferente.

4.1.3. IEEE-1584 E NFPA-70E

A maioria das metodologias comerciais disponíveis para cálculo de risco elétrico, além do NUREG/CR-6850, concentram-se na proteção dos trabalhadores contra os perigos do arco elétrico. Nessas metodologias, as energias potenciais de falha por arco são calculadas para auxiliar na seleção dos requisitos de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) para a segurança dos trabalhadores. Semelhante à avaliação do potencial de HEAF para danificar sistemas, estruturas e componentes (SEC) importantes para a segurança, são estabelecidos limites de perigo ao redor dos equipamentos elétricos e especificações para distâncias de trabalho e EPI a serem utilizados. O objetivo final, baseado na distância e no EPI, é garantir que o trabalhador esteja suficientemente protegido contra os fluxos de energia dos arcos elétricos, prevenindo queimaduras de segundo grau e até a morte. As principais metodologias de cálculo de arco elétrico para segurança do pessoal são detalhadas na NFPA 70E, (NFPA, 2017), e na IEEE 1584 (IEEE, 2018). Modelos computacionais estão disponíveis, a maioria dos quais baseados nos cálculos fornecidos pela IEEE 1584 ou no Apêndice D da NFPA 70E.

Além disso, a NFPA 70E vai além ao delinear requisitos específicos de EPI dentro do limite de proteção contra arcos, com base na energia incidente à qual o trabalhador pode estar exposto. A NFPA 70E, também contém uma abordagem simplificada, criando categorias de risco/perigo que correlacionam com uma tabela de matriz baseada em tarefas para determinar os requisitos de EPI.

Nesta dissertação estão sendo citadas as normas NFPA 70E e IEEE 1584 em suas versões mais atuais. Também é importante ressaltar que os cálculos de EPI e distância

segura para o trabalhador são de extrema importância, porém não são o foco desta dissertação, visto que há vasta literatura sobre esse assunto.

4.1.4. INCÊNDIOS DE FALHAS DE ARCO DE ALTA ENERGIA EM EQUIPAMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO, UMA REVISÃO DE LITERATURA

Em 2008, a NRC contratou os Laboratórios Nacionais Sandia para conduzir uma revisão da literatura sobre HEAF. A revisão da literatura sobre falhas de arco que ocorrem em equipamentos de comutação elétrica (BROWN, NOWLEN, et al., 2008), teve como objetivo avaliar até que ponto a literatura existente pode apoiar melhorias nas atuais APR de incêndio. Esta revisão abrangeu a experiência operacional nacional e internacional desde o início dos anos 1900 até meados dos anos 2000. Concluiu-se que o foco da pesquisa se limitou principalmente aos comportamentos do equipamento e do arco elétrico inicial no contexto da segurança do pessoal. Mais pesquisas foram necessárias para avaliar o fenômeno HEAF no contexto de danos a equipamentos adjacentes.

As principais conclusões desta revisão foram:

- O foco da maioria dos esforços de pesquisa, até aquele momento, limitou-se ao comportamento do equipamento inicial e do próprio arco elétrico inicial;
- A má execução dos testes, as técnicas de medição e as diferenças entre a segurança pessoal (arco elétrico) e a funcionalidade do equipamento limitam a utilidade dos dados de teste existentes;
- É aparente uma desconexão entre o evento HEAF inicial e o impacto nos equipamentos próximos;
- Há necessidade de particularizar o potencial de ignição de combustíveis secundários (fragilidade do alvo), identificar o crescimento e a intensidade do fogo caso ocorra um incêndio, e caracterizar a eficácia e os esforços de supressão de incêndio.

BROWN, NOWLEN, et al., (2008) inferiram que a investigação existente tem um campo bastante limitado e não abordou os principais fatores de interesse para APR além do preliminar e qualitativo. As áreas específicas da metodologia APR de incêndio que requerem trabalho adicional incluem:

- frequência inicial,
- comportamento do fogo duradouro iniciado pelo HEAF, e
- a eficácia e o momento da supressão de incêndios.

Essa revisão da literatura completa 15 anos (2024) e uma quantidade apreciável de pesquisas relacionadas ao arco elétrico, relacionadas nesse artigo, foram realizadas desde então.

4.1.5. A BASE DE DADOS FIRE DA OECD

O projeto FIRE (*Fire Incidents Records Exchange*) da OECD, iniciado em 2002, foi criado para coletar, analisar e compartilhar dados sobre incidentes de incêndio em instalações nucleares. O objetivo principal do FIRE é melhorar a compreensão dos riscos de incêndio em centrais nucleares e desenvolver estratégias eficazes para prevenção e mitigação de incêndios. Os países membros da OECD são: Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, República Checa, Dinamarca, Estônia, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Países Baixos, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, República da Coreia, República Eslovaca, Eslovênia, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos. (NEA, 2009)

A OECD/NEA/CSNI iniciou uma atividade internacional sobre HEAF em 2009 para investigar estes fenômenos em centrais nucleares mais detalhadamente como uma parte importante para uma melhor compreensão do risco de incêndio em centrais nucleares. (BERG, Heinz Peter, RÖWEKAMP, 2011)

Os relatórios emitidos pela OECD, serviram de base para desenvolvimento da maioria dos documentos que serão descritos a seguir.

4.1.6. EVENTOS HEAF NA ALEMANHA

Na Alemanha se destacam os trabalhos realizados pelos pesquisadores Dra. Marina Röwekamp da Sociedade para Segurança de Instalações e Reatores - instituição de pesquisa e consultoria alemã especializada em segurança nuclear e proteção radiológica (*Gesellschaft für Anlagen - und Reaktorsicherheit – GRS*) e membro sênior do banco de dados da OECD/NEA FIRE e projetos HEAF, e Dr. Heinz Peter Berg do Escritório Federal de Proteção Radiológica (BfS) na Alemanha. Os trabalhos abordaram eventos HEAF que ocorreram em instalações internacionais e eventos ocorridos em usinas nucleares alemãs.

Em seu artigo "*Investigation of High Energy Arcing Fault Events in Nuclear Power Plants*", (BERG, Heinz Peter, RÖWEKAMP, 2011), é abordada a investigação de eventos

HEAF em usinas nucleares e apresentou uma perspectiva internacional da experiência operacional sobre HEAF, com os seguintes destaques:

- A base de dados FIRE da OECD/NEA é uma coleção de eventos de incêndio, com informações relevantes das centrais nucleares de 14 países membros;
- A experiência operacional indica a importância do HEAF como um fenômeno relevante que pode ocasionar incêndios subsequentes no componente onde ocorreu o arco, mas também como uma combinação de eventos com outros incidentes;
- HEAF precisa ser considerado no projeto e operação de instalações nucleares.

Algumas normas e orientações nacionais e internacionais já levam em consideração os incêndios HEAF e induzidos por HEAF, por exemplo na Alemanha o KTA (KTA, 2015), "Comitê Técnico Nuclear", que é uma organização responsável pelo estabelecimento de normas técnicas para a segurança de instalações nucleares.

O estudo realizado nesse artigo é relevante para o entendimento mais amplo do fenômeno por vários motivos, dentre eles:

1. Análise Detalhada: o artigo oferece uma análise detalhada dos HEAF, incluindo os fatores que contribuem para sua ocorrência, os danos causados e os métodos de investigação utilizados.

2. Identificação de Causas: os autores investigam as possíveis causas dos HEAF, considerando uma variedade de fatores, como falhas de equipamentos elétricos, condições operacionais e ambientais, e erros humanos.

3. Impacto na Segurança: o estudo avalia o impacto dos HEAF na segurança das usinas nucleares, destacando os riscos associados e as medidas de mitigação necessárias.

4. Recomendações: com base nas descobertas da investigação, são oferecidas recomendações para melhorar a prevenção, detecção e resposta a eventos HEAF, visando aprimorar a segurança e a confiabilidade das usinas nucleares.

Essa análise sistemática destacou que um número significativo de eventos envolvendo explosões eletricamente induzidas e a subsequente propagação rápida de incêndio, resultantes de falhas de arco de alta energia, acarretou consequências consideráveis para o ambiente dos componentes afetados, excedendo os efeitos típicos de incêndios.

Até ao final de 2009, foram identificados trinta e oito eventos de falhas de arco de alta energia na base de dados FIRE da OECD (NEA, 2009) que representavam 6% do total de 343 eventos.

Como resultado da análise das bases de dados internacionais do (*International Reporting System – IRS*) e do (*International Nuclear Event Scale – INES*), especialistas alemães da GRS desenvolveram um questionário em nome do órgão regulador federal alemão e da *Germanischer Lloyd (GL) Bautechnik GmbH*, agindo em nome de uma autoridade estatal local. Esse questionário consistia em uma lista de perguntas destinadas a serem respondidas principalmente pelos licenciados (BERG, Heinz Peter, RÖWEKAMP, 2011).

Após sua elaboração, o questionário foi discutido nacionalmente e com um grupo de especialistas internacionais. As respostas a esse questionário forneceram informações adicionais sobre os fenômenos básicos relacionados às falhas por arco elétrico de alta energia. Além disso, essas respostas permitiram a avaliação desses eventos, bem como a identificação de medidas preventivas eficazes a serem implementadas em instalações nucleares.

O questionário foi dividido em duas partes. Na parte 1 foram feitas questões relativas a eventos ocorridos em usinas nucleares: a existência de eventos reportáveis na experiência operacional, quais consequências e efeitos, se houve necessidade de supressão de incêndio, se as causas dos eventos são conhecidas e suas ações corretivas.

A parte 2 é constituída de perguntas sem observações de eventos em usinas nucleares, questionaram sobre medidas preventivas previstas para limitar as consequências de falhas por arcos de alta energia e a avaliação sem observações diretas dos eventos, ou seja, são consideradas os eventos de falha por arco elétrico de alta energia e seus efeitos potenciais nas revisões periódicas de segurança (análise determinística do status de segurança, bem como avaliação probabilística de segurança).

Os resultados fornecidos por este questionário feito pela consulta alemã, expostos a seguir, foram apresentados no Relatório Tópico N° 1 (NEA, 2013).

- Os incidentes HEAF nas centrais nucleares alemãs foram prontamente identificados pelos sistemas de alarme e detecção de incêndio, bem como emissões significativas de fumaça. Um terço dos eventos HEAF resultou em incêndios.
- Em poucos casos os danos ultrapassaram o componente onde o HEAF ocorreu, e as explosões causadas não danificaram outros componentes ou áreas da planta além do ponto inicial do evento, tão pouco afetaram a função essencial dos sistemas de proteção contra incêndio;

- As causas técnicas, junto ao desempenho do fator humano, erros procedimentais e envelhecimento dos materiais são as principais causas dos eventos HEAF observados nas centrais nucleares alemãs;
- Algumas medidas preventivas contra à repetição de falhas em componentes de alta energia foram ou estão sendo implementadas pelos operadores das centrais nucleares alemãs;
- Pressupõe-se que falhas em disjuntores e painéis de alta tensão (> 10 kV) e o aumento resultante da pressão do ar ocorrem e podem ser gerenciados. Investigações específicas desses cenários resultaram em medidas adicionais para alívio de pressão dentro dos edifícios elétricos das centrais nucleares alemãs.

4.1.7. OECD PROJETO FIRE – RELATÓRIO TÓPICO Nº. 1

Conforme mencionado anteriormente, a OECD/NEA iniciou em 2009 uma atividade para investigar mais detalhadamente os fenômenos HEAF em centrais nucleares, visando aprimorar a compreensão do risco de incêndio em usinas nucleares por meio de um grupo internacional capaz de reunir conhecimento e recursos.

Desse modo o Relatório Tópico Nº1 (NEA, 2013) surge com o principal objetivo de examinar se o HEAF é um fenômeno comum e como se desenvolve, ampliando o conhecimento deste fenômeno de incêndio específico, melhorando os padrões de segurança elétrica e concebendo medidas preventivas adequadas.

O projeto FIRE da OECD realizou uma revisão inicial da experiência operacional relacionada a eventos HEAF, que serviu como ponto de partida para a investigação. Esta revisão concentrou-se nos eventos registrados na base de dados de incidentes de incêndio da OECD, a qual possuía até aquela data 34 países membros.

Esse relatório foi um marco importante na compreensão e abordagem dos eventos de incêndios causados por falhas de arco de alta energia. E representou um esforço significativo para analisar e documentar os riscos associados a esse evento, incluindo os equipamentos e componentes envolvidos, a duração do arco, a localização, os impactos nos SEC e as ações do operador. Um total de 48 eventos HEAF foram analisados durante esse processo.

Os 48 eventos representam 11,5% de um total de 415 eventos de incêndio, coletados no banco de dados até meados de 2012. Estes 11,5% é um valor que não se pode ignorar

na base de dados FIRE da OECD. No entanto, no relatório é mencionado que o tamanho da amostra de eventos HEAF é relativamente pequeno.

Dentre os pontos importantes verificados no documento, destacam-se:

- 1 - Identificação: descrição detalhada do que são as falhas de arco de alta energia e como elas ocorrem em sistemas elétricos;
- 2 - Riscos e Consequências: avaliação dos riscos associados aos HEAF e das consequências potenciais, incluindo danos a equipamentos, riscos de incêndio e impactos na segurança humana;
- 3 - Estudos de Caso: análise de casos reais de HEAF, fornecendo perspectiva sobre as circunstâncias em que esses eventos ocorreram, os fatores que contribuem para sua ocorrência e as medidas de mitigação que podem ser implementadas;
- 4 - Normas e Regulamentações: revisão das normas e regulamentações existentes relacionadas à prevenção de HEAF e à proteção contra incêndios causados por esses eventos;
- 5 - Recomendações: sugestões para melhorar a prevenção, detecção e resposta a HEAF, incluindo recomendações para atualizações de normas, melhorias de projeto e práticas de manutenção.

As principais conclusões desta revisão foram:

- A fração de 11,5% de eventos HEAF inclui também grandes transformadores de pátio, que falham periodicamente de forma catastrófica;
- A probabilidade de danos aos SEC é significativamente maior entre os eventos HEAF, que em outras categorias de eventos na base de dados FIRE da OECD;
- Os eventos HEAF em compartimentos elétricos de alta ou média tensão tiveram a maior parcela relativa de importância para a segurança;
- Baseado nos dados fornecidos nesse relatório, a probabilidade condicional de um evento HEAF é calculada em $8,0E-3$ /ano (HUGHES, 2017);
- Verificou-se que como resultado da onda de pressão devido à explosão do arco danificou-se 2 portas corta-fogo nos 48 eventos (HUGHES, 2017).

- Vinte e um eventos foram considerados significativos para a segurança ou tinham o potencial de comprometer a segurança nuclear em diversas configurações ou condições. Isso ocorreu devido à perda de um ou mais sistemas de segurança redundantes, ou à influência em compartimentos adjacentes por meio de efeitos diretos ou consequentes do incêndio. O impacto nos compartimentos vizinhos foi devido aos cabos danificados pelo fogo (NEA, 2015a).

4.1.8. CONSEQUÊNCIAS DO RELATÓRIO TÓPICO Nº. 1

O esforço em conduzir uma análise da experiência operacional internacional motivou a realização da série de testes experimentais denominada Fase 1⁴. Em sua conclusão, o Relatório Tópico Nº1 observa que a amostra estatística utilizada é limitada e sugere que "experiências sejam conduzidas" para obter dados científicos abrangentes sobre incêndios relacionados aos fenômenos HEAF (NEA, 2013).

Após a publicação do relatório da OECD, houve um aumento na atenção para o desenvolvimento de normas e regulamentações destinadas a prevenir e lidar com HEAF. Organizações internacionais, como a IEEE, NFPA e a IEC (IEEE 1584, NFPA 70E e IEC 61439), trabalharam no desenvolvimento de padrões para equipamentos elétricos mais seguros e práticas de instalação.

Como consequência do relatório da OECD (NEA, 2013), teve início um projeto de pesquisa experimental denominado Análise Conjunta de Falhas de Arco (*Joint Analysis of Arc "JOAN of Arc" Faults*) - Programa Internacional de Testes da OECD para Falhas de Arco de Alta Energia (HEAF) 2013/2014, sob o prognóstico da NEA e liderado pelo RES (NRC, 2018b).

Este projeto foi identificado como parte do programa de banco de dados de eventos de incêndio da OECD com o intuito principal de realizar experimentos cuidadosamente planejados para obter dados científicos de incêndio sobre o fenômeno HEAF e usar os dados desses experimentos e eventos anteriores para elaborar um modelo explicativo que trate dos modos de falha e das consequências dos HEAF (TAYLOR, G, HAMBURGER, et al., 2019).

⁴ Foi denominado Fase 1 um programa amplo de investigação e testes HEAF, patrocinado pela OECD e com a participação de vários estados membros, para melhor interpretação desses eventos e suas possíveis consequências. Dois relatórios gerados por esse programa são a NUREG/IA-0470 e NEA/CSNI/R(2017)7.

O projeto foi realizado como parte de um esforço internacional mais amplo da OECD. A NRC liderou os testes físicos e a instrumentação dos equipamentos. Os países membros que participaram do projeto forneceram os equipamentos testados, bem como conhecimentos técnicos (NRC, 2018b).

4.1.9. NUREG-2169

A NUREG-2169, (NRC, 2015), apresenta a análise de dados de eventos de incêndio atualizada até o ano de 2009 para estimar as frequências de ignição de incêndio e as probabilidades de não supressão, visando melhorar as aplicações da APR de incêndio em centrais nucleares. Essas análises iniciais foram desenvolvidas na NUREG/CR-6850 (NRC, 2005) e revisadas no Suplemento 1 (NRC, 2009) desse relatório. A necessidade de atualizar as frequências de ignição indicadas pela NUREG/CR-6850 surge durante o período de 2006 a 2009, com as primeiras aplicações deste relatório que resultaram em estimativas de risco de incêndio aparentemente conservadoras. Esses resultados iniciais exigiram ajustes e melhorias nesse relatório.

Os novos dados de eventos de incêndio ampliam o banco de dados de eventos de incêndio do EPRI até 2009, estendendo-o em 10 anos em relação aos estudos anteriores e aplicando melhorias de metodologia. Médias e incertezas são fornecidas na forma de estimativas pontuais e distribuições de probabilidade. Por isso foram considerados um aprimoramento significativo das análises originais (NRC, 2015).

4.1.10. RELATÓRIO NEA/CSNI/R(2015)10

No ano de 2015 foi publicado o relatório Revisão dos Métodos de Cálculo Usados para Prever Danos Causados por Eventos HEAF (NEA, 2015a), que expõe o histórico do programa iniciado pela NEA da OECD, para fornecer uma investigação aprofundada sobre os eventos HEAF nos estados membros da NEA. É apresentada uma revisão dos métodos de cálculo até 2015, que é dado pela NUREG/CR-6850 (NRC, 2005), utilizados para prever danos causados por eventos HEAF aos SEC.

Esse relatório elencou alguns temas relevantes sobre eventos HEAF, mesmo já tendo sido ressaltado em NEA (2013) que devido ao tamanho relativamente pequeno da amostra de eventos HEAF na base de dados FIRE da OECD, ainda não poderiam ser obtidas conclusões estatísticas significativas com um nível de confiança razoável. Contudo um fato relevante merece destaque:

- Não houve registros de eventos de incêndio de HEAF em transformadores de alta tensão que tenham comprometido de forma inadmissível a segurança nuclear.

Com base em um período total estimado de observação de aproximadamente 7 000 Y/R (Ano Reator, unidade que mede os anos de operação de um reator nuclear) para a coleta de dados da OECD OECD FIRE até 2012, com uma média de 80% de tempo de operação em plena potência, a probabilidade condicional de ocorrência de um evento HEAF com incêndio é a seguinte:

- Durante um ano de operação em plena potência, é da ordem de E-03;
- Durante os outros modos operacionais, é cerca de meia ordem de grandeza superior (E-02), ou seja, aproximadamente o dobro daquela durante a operação com energia.

O relatório cita alguns assuntos que necessitam maiores investigações:

- Mais de trinta por cento dos eventos HEAF registrados no banco de dados (21 de 48) foram considerados eventos significativos para a segurança, seja devido à perda da função necessária de um ou mais itens redundantes importantes para a segurança, ou seja, a perda de trens de segurança, ou devido aos compartimentos adjacentes serem impactados por efeitos diretos ou consequentes do incêndio. Além disso, esses eventos tinham o potencial de comprometer inaceitavelmente a segurança nuclear em diferentes condições extremas de funcionamento.
- Painéis elétricos de alta ou média tensão, disjuntores e dutos/cabos contribuem principalmente para a segurança. No entanto, observou-se que os painéis elétricos apresentam a maior frequência de ocorrência de eventos HEAF significativos.
- As barreiras contra incêndio geralmente permanecem intactas após um evento HEAF, com apenas dois eventos danificando portas corta-fogo devido ao aumento de pressão, e nenhum evento comprometendo outras barreiras contra incêndio.
- Todos os casos de impacto direto em outros compartimentos foram atribuídos à propagação de gases quentes ou à entrada de fumaça em barreiras corta-fogo. O impacto consequente foi principalmente causado por cabos danificados pelo fogo.

O relatório traz ainda algumas recomendações, das quais, as mais relevantes são:

- Criar um modelo mais preciso que leve em consideração os modos de falha e as consequências dos eventos HEAF.
- Estabelecer correlações baseadas no tempo de ignição utilizando variações no fluxo de calor incidente.

- Validar os modelos existentes para avaliar o potencial de danos dos SEC importantes para a segurança.
- Avançar o conhecimento atual e proporcionar uma caracterização mais detalhada do HEAF na avaliação probabilística de risco de incêndio (Fire PRA).
- Oferecer diretrizes para prever os danos potenciais de eventos HEAF e para apoio regulatório (NEA, 2015a).

4.1.11. NUREG/IA-0470

A NUREG/IA-0470 (TSUCHINO, KABASHIMA, *et al.*, 2016), é um Relatório de Acordo Internacional, publicado em 2016, entre a NRC e a NRA na área de pesquisa relacionada a incêndios, com foco em interpretar o evento HEAF induzido por terremoto que ocorreu em um painel de distribuição de alta tensão (6,9 kV)⁵ na Unidade 1 da Usina Nuclear de Onagawa, em 11 de março de 2011 durante o Grande Terremoto do Leste no Japão.

A responsabilidade pela organização dos testes e preparação das análises e resultados foram da NRA. Os testes foram realizados nos Laboratórios KEMA em Chalfont, Pensilvânia. A NRC participou de todos os testes e forneceu suporte para instrumentação especializada, consultoria técnica, suporte geral para testes e a preparação final do relatório para publicação.

Estes testes foram realizados entre 2013 e 2015, com objetivo de simular o projeto e as condições operacionais do evento ocorrido em Onagawa e determinar se ocorreriam incêndios subsequentes. Para isso os pesquisadores modificaram o equipamento dos EUA para melhor corresponder às geometrias do equipamento japonês, pois o painel de Onagawa tinha um arranjo de barramento mais aberto do que a unidade GE *Magneblast* fornecida para o teste (HUGHES, 2017). Os testes incluem centros de controle de motores (CCM) de 480 V e gabinetes de painéis de distribuição (PD). No laboratório KEMA, a fonte é um gerador, o qual fornece as correntes de falta no início do teste. Os testes realizados visam aprender mais sobre os fenômenos HEAF e a ZOI dos danos causados pelos incêndios subsequentes, conforme descrito em NUREG/CR 6850, apêndice M (NRC, 2005).

⁵ No Brasil e nos EUA, 6,9 kV é considerado média tensão. No Japão 6,9 kV é considerada alta tensão.

Os resultados dos testes mostraram danos semelhantes aos observados no incidente real, incluindo tempo de duração, nível de energia e incêndios resultantes nos cabos. No entanto, os danos estruturais globais e a extensão dos danos internos do incêndio foram significativamente menos graves do que os observados em Onagawa.

Os testes conduzidos no CCM e no PD forneceram valiosas informações sobre o comportamento do HEAF e os incêndios resultantes em sistemas de baixa tensão. Parâmetros como temperatura, fluxo de calor, taxa de liberação de calor durante o arco, bem como os incêndios subsequentes.

Em quatro dos seis testes, os cabos de baixa tensão no quadro pegaram fogo. A pesquisa indicou que a energia mínima necessária para iniciar incêndios era de aproximadamente 60 MJ para esta configuração de média tensão, um valor superior ao observado em testes de baixa tensão realizados na mesma pesquisa. Essa diferença foi atribuída à maior ventilação dos gabinetes de média tensão, permitindo a dissipação de energia. Este resultado é esperado, pois o equipamento de média tensão é projetado para suportar energias mais elevadas (HUGHES, 2017).

Nos testes de 1 a 3 a falha iniciou-se no gabinete central (gabinete nº 8). No teste 2, o arco perfurou a lateral do gabinete, causando danos no gabinete nº 7. Nos testes de 4 a 6, o arco inicial começou no gabinete nº 7 e, alguns minutos depois, um segundo arco foi iniciado no gabinete nº 8. O teste 4 resultou nos maiores danos (TSUCHINO, KABASHIMA, et al., 2016).

Nos testes realizados, o equipamento analisado possuía barramentos de alumínio para replicar as condições de Onagawa. A oxidação desses barramentos foi identificada como um fator crucial nos danos extensivos observados em Onagawa. A oxidação do alumínio durante um evento HEAF é um fenômeno complexo e não totalmente compreendido, mas é sabido que a reação de oxidação do alumínio é exotérmica, produzindo significativamente mais energia do que o previsto. Portanto, ao analisar os efeitos do HEAF, é essencial considerar a energia associada a arcos envolvendo alumínio (HUGHES, 2017).

Esse relatório foi pioneiro ao identificar a alta energia térmica liberada na presença de componentes elétricos de alumínio, destacando a necessidade de uma compreensão mais profunda da energia gerada pela oxidação dos barramentos de alumínio, frequentemente usados em painéis. Embora os danos durante os testes tenham sido menores, o relatório sugere que o evento HEAF de Onagawa tenha durado mais do que

os dos testes, que tiveram uma duração máxima de 3 segundos. A duração exata do evento de Onagawa não é conhecida, e a falha de proteção pode ter sido causada pelo terremoto (HUGHES, 2017, TSUCHINO, KABASHIMA, et al., 2016).

No entanto, de acordo com HUGHES (2017), a NUREG/IA-0470 não esclarece as significativas diferenças nas estimativas de energias de oxidação observadas em diversos testes. Questões cruciais sobre a oxidação do alumínio e seu papel nos eventos HEAF ainda precisam ser respondidas, como, por exemplo: quais fatores impulsionam as discrepâncias observadas nos testes? A onda de pressão gerada pela explosão do arco exerce alguma influência? Qual a proporção de alumínio vaporizado que realmente se oxida? A dispersão da nuvem de vapor tem algum impacto? A oxidação do alumínio não foi abordada em outras pesquisas e normas sobre arcos de alta energia, como as análises de arco voltaico na IEEE 1584 e os requisitos de vestuário de proteção individual da NFPA 70E. As investigações sobre arco elétrico que embasaram essas normas incluíram centenas de testes, mas não identificaram o fenômeno da oxidação do alumínio. A maioria dos testes de arco elétrico não utilizou eletrodos de alumínio e, em alguns estudos, o material dos eletrodos não foi especificado. Ademais, muitos dos testes de cenários de arco elétrico foram conduzidos com durações inferiores a 0,5 segundos, o que não resultou em fusão significativa dos eletrodos. Assim, o papel da oxidação do alumínio pode ter sido inadvertidamente negligenciado.

4.1.12. RELATÓRIO NEA/CSNI/R(2017)7

A NRC liderou um programa experimental internacional, de 2014 a 2016, com documentação emitida em maio de 2017 (NEA, 2017). Estes testes fazem parte da chamada Fase 1, e consistiram em vinte e seis experimentos em escala real conduzidos durante um período de três anos, que foram realizados em diversos equipamentos elétricos doados, idealizado para confirmar as zonas de influência na NUREG/CR-6850 (NRC, 2009).

As falhas de arco foram executadas em gabinetes com potência nominal de 0,48 a 10 kV utilizando o mesmo procedimento adotado nos testes realizados na NUREG/IA 0470 (TSUCHINO, KABASHIMA, *et al.*, 2016). Foram feitas medições elétricas em tempo real, incluindo os fluxos de calor e as energias incidentes em vários locais ao redor dos gabinetes elétricos durante os experimentos. Também foram medidas as pressões internas

do gabinete e a taxa de liberação de calor durante a fase pós-arco. Os resultados completos dos testes da Fase 1 estão documentados no relatório (NEA, 2017).

Uma das observações cruciais, durante os testes, foi que os eventos HEAF envolvendo alumínio resultaram em danos físicos mais severos ao equipamento em comparação com aqueles que envolviam apenas cobre e aço nos níveis de tensão testados. A equipe RES também observou a dispersão de subprodutos de alumínio eletricamente condutores em toda a área, que causou curto-circuito e curto para terra de equipamentos elétricos na área. A equipe da RES observou que os testes HEAF envolvendo alumínio danificaram o equipamento de medição e registro de teste e o fornecimento elétrico da instalação de teste muito além dos limites de danos aproximados na NUREG/CR-6850.

Sobre os testes, é importante ressaltar que os equipamentos com itens de cobre exibiram danos semelhantes aos postulados na metodologia apresentada na NUREG/CR-6850, Apêndice M (NRC, 2005). No entanto, os resultados obtidos para equipamentos contendo componentes de alumínio apresentaram danos muito além dos atuais modelos de danos HEAF. Esses resultados confirmam os resultados dos testes realizados na NUREG/IA-0470 (TSUCHINO, KABASHIMA, et al., 2016).

Dos vinte e seis experimentos realizados, percebeu-se que os experimentos 23 e 26 se destacaram dos demais. O experimento 23 foi realizado em um painel de 480 V (baixa tensão) e o experimento 26 foi realizado em seção de barramento de 4,16 kV. Em ambos o alumínio foi consumido durante o HEAF, os dispositivos de medição foram danificados ou ultrapassaram sua faixa máxima de medição, verificou-se também danos às instalações de teste. Como resultado, esses instrumentos não conseguiram registrar com precisão a temperatura máxima real e o fluxo de calor. Além disso, observou-se que os eventos HEAF envolvendo alumínio geravam um composto condutor transportado pelo ar, que revestia a instalação de teste, causando curtos-circuitos e caminhos de corrente não intencionais no barramento exposto da instalação de teste, localizado a vários metros de distância do equipamento de teste. Em ambos os casos, as ZOI indicadas pela NUREG/CR-6850 foram ultrapassadas.

4.1.13. PROGRAMA DE QUESTÕES GENÉRICAS – PRE-GI-018

A NRC conduziu uma pesquisa informal entre os países membros que patrocinam a fase inicial dos testes da Fase 1, e identificou que as usinas nucleares dos EUA podem ser únicas na quantidade de alumínio utilizado em componentes elétricos. Em 2016, a NRC

incluiu o HEAF envolvendo alumínio no Programa de Questões Genéricas de Segurança (GI). Embora tenha sido determinado que não havia preocupação imediata de segurança para as centrais nucleares em operação, foi reconhecida a necessidade de trabalho adicional para assegurar uma proteção adequada contra HEAF envolvendo alumínio nas unidades operacionais (MELLY, TAYLOR, et al., 2019).

Para abordar este problema, o NRC desenvolveu uma série de testes com o objetivo de compreender melhor os materiais de alumínio envolvidos nos HEAF. Estes testes são independentes, mas complementares, aos programas de testes HEAF da OECD. Além disso, o NRC formou um grupo de trabalho de especialistas em colaboração com o EPRI para desenvolver os experimentos e avaliar os riscos associados.

Para avaliar de maneira abrangente o PRE-GI-018, a NRC identificou a necessidade de mais informações e optou por realizar um *workshop* para compartilhar essa questão, buscando *feedback* e sugestões das partes interessadas. O *workshop* foi motivado pela intenção da NRC de comunicar as medidas já tomadas e planejadas em relação ao perigo de HEAF envolvendo componentes de alumínio. Além disso, visava obter sugestões das partes interessadas para apoiar a definição de condições de teste realistas e representativas, otimizando assim o uso dos recursos da NRC durante a avaliação do impacto dos HEAF com componentes de alumínio. Os principais objetivos do *workshop* incluíam: informar as partes interessadas sobre o status do PRE-GI-018 e pesquisas associadas; revisar e abordar os comentários públicos recebidos sobre o projeto do plano de teste da Fase II; solicitar e analisar informações dos parceiros da indústria sobre tipos e configurações comuns de equipamentos para orientar os testes futuros; e proporcionar uma oportunidade para o *feedback* público sobre os testes subsequentes (MELLY, TAYLOR, et al., 2019, TAYLOR, G, HAMBURGER, et al., 2019).

4.1.14. TABELA DE IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FENÔMENOS - PIRT

Em 2016, a Fase 1 do projeto HEAF foi finalizada. O relatório resultante (NEA, 2017) trouxe recomendações sobre as áreas que necessitam de mais testes, especialmente para aprofundar a compreensão da relevância de variáveis específicas, como material do barramento, tensão de operação, corrente e duração do arco, na severidade do HEAF (NEA, 2023). A Fase 2 do projeto HEAF começou em fevereiro de 2017, com uma iniciativa da NRC, chamada Exercício de Identificação e Classificação de Fenômenos

(*Phenomena Identification and Ranking Table* - PIRT) com participantes dos países membros do primeiro programa experimental. O PIRT identificou e priorizou os fenômenos que requerem estudos adicionais no próximo programa de testes (NRC, 2018b).

O objetivo do PIRT foi desenvolver uma lista ordenada de fenômenos relevantes que influenciam eventos HEAF. O exercício contou com a participação de especialistas de várias organizações internacionais, incluindo o *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire* (IRSN) da França, o Instituto Coreano de Segurança Nuclear (KINS), a GRS da Alemanha, a NRA do Japão, o Instituto Central de Pesquisa da Indústria de Energia Elétrica (CRIEPI) do Japão e a NRC nos EUA (HAMBURGER, KENNETH, 2018).

O processo PIRT envolveu a avaliação de cenários específicos de HEAF, com base em situações comumente encontradas em usinas nucleares. Para cada cenário, foram definidos objetivos específicos a serem alcançados na análise do cenário. Os especialistas identificaram e classificaram fenômenos, avaliando a importância e o estado atual do conhecimento sobre cada fenômeno, bem como o potencial para desenvolver novos dados que possam melhorar as ferramentas existentes (MELLY, HAMBURGER, et al., 2019).

Os cenários analisados incluíram:

1. HEAF em um gabinete elétrico com uma bandeja de cabos acima;
2. HEAF em um barramento passando sobre um gabinete elétrico;
3. HEAF em um gabinete elétrico situado em um banco de gabinetes semelhantes.

Os fenômenos classificados como de "nível um" - aqueles com alta importância e baixo estado de conhecimento - foram considerados prioridades para futuras investigações. Entre eles, destacam-se:

- Caracterização do arco elétrico: efeitos térmicos e magnéticos, materiais ejetados do arco, como fumaça, gás ionizado e particulados condutores, e a localização e migração do arco.
- Efeitos de pressão: degradação do limite de pressão do compartimento, impacto de choque mecânico e de projéteis.
- Mitigação do arco: uso de equipamentos resistentes a arco, isolamento térmico ou blindagens para minimizar danos.
- Incêndio interno resultante: probabilidade, impacto e estudo pormenorizado de um incêndio provocado por um evento HEAF.

Para garantir a integridade do PIRT, foi preparada uma biblioteca de material relevante, compartilhada com os participantes meses antes do exercício. Esta biblioteca proporcionou uma base comum e abrangente de conhecimento, permitindo que os especialistas fundamentassem suas opiniões e julgamentos. A revisão da literatura pressupôs que o material reunido refletia com precisão o estado da arte sobre o assunto, e os participantes foram convidados a contribuir com quaisquer literaturas relevantes.

Em janeiro de 2018, o NRC emitiu a NUREG-2218 (HAMBURGER, 2018) que apresenta os resultados do PIRT. As conclusões deste trabalho incluíram uma lista ordenada de fenômenos e parâmetros relevantes para o perigo HEAF, compreensão das medidas de mitigação que apoiam a filosofia de segurança de defesa em profundidade, compreensão das características do incêndio resultante e o apoio a aplicações de APR de incêndio, bem como influenciaram diretamente o desenvolvimento de matrizes de teste em escala real, fundamentais para a condução de testes experimentais que buscam preencher lacunas de conhecimento, como a fragilidade de alvos em exposições de curta duração e alto fluxo de calor (TAYLOR, G, HAMBURGER, et al., 2019).

4.1.15. PROGRAMA DE TESTES DA OECD

A Fase 2, também chamada HEAF 2, do programa de pesquisa compreende duas partes diferentes do programa de testes: a primeira parte, conduzida pela NRC, foi resumida no item 4.1.14 e a segunda fase, que na presente data se encontra em andamento, prevista para durar de 2019 a 2024, abrange o programa de testes da OECD em gabinetes elétricos e dutos de barramento. Os testes em gabinetes elétricos foram concebidos com uma configuração padrão para garantir que possam ser repetidos. Alguns invólucros foram retirados de usinas nucleares desativadas para serem avaliados no projeto. Já os testes nos dutos de barramento foram planejados em uma localização de arco e direção de ejeção de plasma confiáveis e conhecidas. Devido à pandemia de COVID-19, o início dos testes foi adiado para meados de 2022. Em agosto de 2022, uma primeira série de seis testes foi conduzida, juntamente com testes adicionais realizados nacionalmente. Esses testes se concentraram nos barramentos e dutos, avaliando os efeitos dos materiais alumínio e cobre. Originalmente previsto para encerrar em 2022, o projeto HEAF foi estendido até junho de 2024 para abranger a conclusão da segunda série de testes (NEA, 2023).

Os experimentos da Fase 2 do programa HEAF têm como objetivo principal simular cenários mais realistas, incluindo incêndios subsequentes típicos de centrais nucleares, que reflitam a experiência operacional. Nesta segunda etapa, serão testadas as experiências específicas da OECD com barramentos e barramentos/disjuntores em gabinetes, procurando recriar condições típicas de centrais nucleares.

Os testes envolvem durações variadas do arco elétrico, utilizando pelo menos dois dos três valores predefinidos: 2 s, 4 s e 8 s. Além disso, serão escolhidas duas correntes entre 15 kA, 25 kA e 35 kA. A Autoridade Holandesa para Segurança Nuclear e Proteção contra Radiação (ANVS) também está interessada nesses experimentos, uma vez que um incêndio induzido por HEAF foi registrado na base de dados FIRE da OECD, ocorrido na central nuclear de Borssele, a única em operação nos Países Baixos.

Os Países Baixos participam ativamente do HEAF 2 da OECD, fornecendo, junto com a Alemanha, gabinetes de disjuntores de média tensão previamente utilizados em centrais nucleares para os testes HEAF. Esses testes buscarão manter geometrias realistas, sempre que possível, utilizando dois ou mais gabinetes alinhados.

No total, nove países (Alemanha, Canadá, Coreia, Espanha, EUA, França, Finlândia, Holanda e Japão (HAMBURGER, 2018)) estão envolvidos no Projeto HEAF 2, com o Escritório de Pesquisa da NRC dos EUA e seus subcontratados conduzindo os experimentos e todas as medições. Os outros oito países contribuem financeiramente, com doações de equipamentos (como quadros elétricos de média tensão), ou com uma combinação de ambos. Estão previstos mais de trinta experimentos em escala real.

4.1.16. EVENTOS COMBINADOS

A experiência operacional em diversas instalações industriais revelou que a combinação de eventos de incêndios com outros tipos de incidentes ocorre ao longo da vida útil das mesmas. De acordo com RÖWEKAMP, LEHTO, et al. (2016), o encadeamento de um incêndio frequentemente pode ser descrito como um processo contínuo estocástico que é influenciado por diversos fatores aleatórios. Somados a isso, perigos naturais raramente acontecem de forma isolada (BERG, Heinz-Peter, FRITZE, *et al.*, 2016) e aqueles que surgem em locais específicos tendem a provocar ou induzir a ocorrência de outros perigos.

O relatório da OECD/NEA, (NEA, 2016), foi elaborado para examinar as combinações de eventos presentes no banco de dados do projeto NEA (FIRE), a partir das

lições aprendidas com os acidentes do reator de Fukushima Daiichi. Embora esse documento não se concentre especificamente em acidentes de falhas de arco de alta energia (HEAF), observa-se uma presença relevante desses eventos em tais combinações.

Até o final de 2014, 47 dos 448 eventos de incêndio registrados na base de dados FIRE (NEA, 2015b) foram identificados como combinações de incêndios com outros incidentes, correspondendo a aproximadamente 10,5% do total, fato que não pode ser desprezado. Dessas 47 combinações, sete (cerca de 15%) envolvem múltiplos eventos. Duas dessas combinações ilustram um efeito dominó, onde um terremoto resulta em uma falha de arco de alta energia (HEAF) e um subsequente incêndio.

No contexto dos eventos HEAF identificados no relatório, há um total de 31 eventos combinados envolvendo HEAF. Na classificação de incêndio inicial seguido por um evento consequente, foi observado um incêndio induzindo HEAF, e dois eventos de incêndio resultando em HEAF com subsequentes incêndios. Na categoria de evento inicial seguido por um incêndio, houve vinte e quatro incêndios causados por HEAF (representando 5% de todos os eventos no banco de dados) e cinco representando cadeias de eventos envolvendo incêndio. Uma dessas cinco cadeias começou com um HEAF, que induziu um incêndio e uma subsequente inundação interna. Dois HEAF induzidos por sismos resultaram em incêndios internos, e outro evento natural externo, chuvas intensas, causaram um HEAF seguido de um incêndio (NEA, 2016). O gráfico da Figura 17 ilustra os dados descritos.

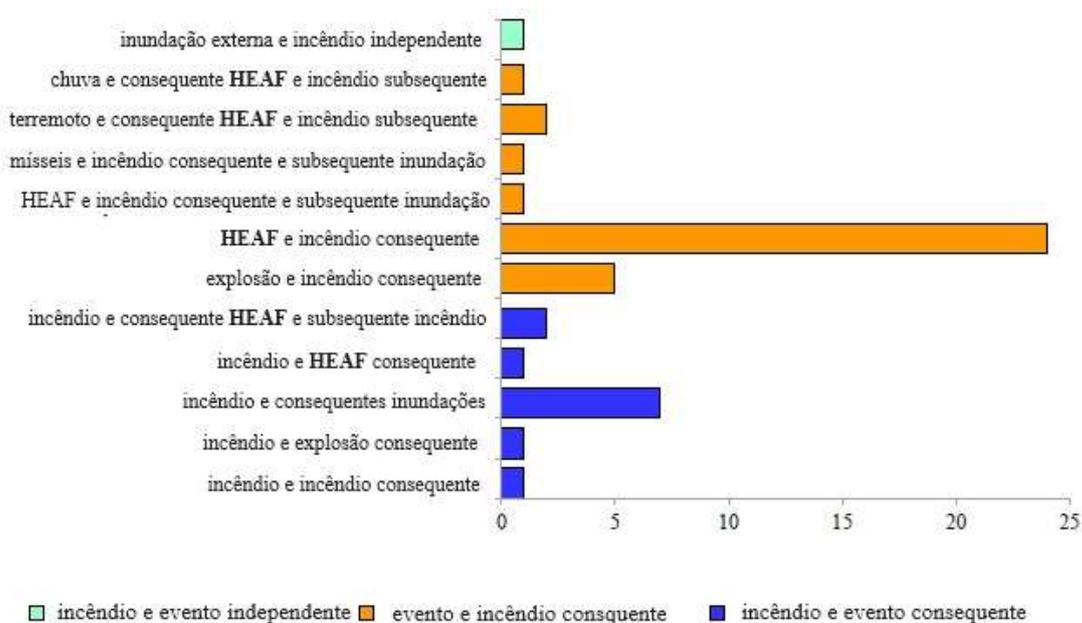


Figura 17 - Diferentes tipos de combinações de incêndios com outros eventos. Adaptado de NEA (2016).

Em virtude dos dados apresentados, o relatório em sua conclusão sugere que essas combinações de eventos necessitam de atenção especial em relação a medidas preventivas.

Outra conclusão a que se chegou foi que a maioria das relações entre HEAF e incêndio levou a consequências mais sérias e alterou o modo de funcionamento da instalação (BERG, Heinz-Peter, FRITZE, *et al.*, 2016).

4.1.17. NUREG-2262

Desde a publicação da NUREG/CR-6850 e seu Suplemento 1, o entendimento sobre os fenômenos de arcos elétricos de alta energia evoluíram consideravelmente. Foi alcançada uma compreensão detalhada do sistema de distribuição elétrica em usinas nucleares e seu desempenho durante falhas, juntamente com a revisão e categorização de eventos no setor. Testes em escala real, testes menores e simulações aprimoraram a compreensão dos parâmetros que influenciam as dimensões da zona de influência do HEAF.

A NUREG-2262 (NRC, 2023a) fornece orientações detalhadas, combina pesquisas anteriores sobre HEAF e oferece métodos e dados para calcular de maneira mais realista o risco associado a esses eventos em plantas nucleares. O grupo de trabalho HEAF, formado pela NRC e EPRI sob um memorando de entendimento formal, foi responsável pela elaboração desse documento e teve como objetivo melhorar a metodologia existente para análise de riscos de HEAF em usinas nucleares.

As estimativas de frequência de ignição e de falha na supressão foram atualizadas com base na experiência operacional mais recente. A seleção da ZOI foi ampliada significativamente, abrangendo diferentes componentes como painéis de manobra, centros de carga e barramentos. O *Fire Dynamics Simulator*, *software* de dinâmica de fluidos computacional, foi validado com testes em escala real e é utilizado para prever a exposição térmica de alvos próximos a um HEAF (NRC, 2023a).

Uma importante melhoria na metodologia atualizada é a inclusão dos tempos de eliminação de falhas, mais especificamente, a configuração do relé de sobrecorrente temporizada (51) do transformador de potência auxiliar. Essa modificação permite uma representação mais precisa dos danos do HEAF, levando em conta as características específicas da planta em relação à duração dos tempos de eliminação de falhas. Isso pode levar a um aumento ou redução dos ZOI e no risco associado, em comparação com o

método NUREG/CR-6850. Plantas com tempos de eliminação de falhas mais longos, resultando em ZOI maiores, podem apresentar um aumento no risco estimado de HEAF, em contraste com as estimativas anteriores feitas com o método NUREG/CR-6850.

A ZOI varia conforme o material do invólucro do barramento e o tempo de eliminação da falha, no entanto para centros de carga, comutadores e barramento segregado, o relatório destaca que o material do condutor (alumínio ou cobre) não afeta as dimensões da ZOI.

O material do invólucro (alumínio ou aço) tem impacto nas dimensões da ZOI para barramentos não segregados (NSBD), visto que o invólucro de aço requer mais energia para romper o material do revestimento, resultando conseqüentemente em menos exposição a alvos próximos. Um invólucro de alumínio rompe muito antes que o de aço e sujeita os alvos próximos a condições de falha. As ZOI NSBD obtidas após os estudos realizados são maiores que aqueles descritos em NUREG/CR-6850, Suplemento 1.

Esse relatório fornece uma metodologia para modelar os perigos resultantes de HEAF, enfocando durações esperadas e probabilidades conforme diferentes alinhamentos do sistema de distribuição elétrica. A metodologia abrange diversos tipos de sistemas e proteções em centrais nucleares, locais de falhas e suas durações, impactando a localização, frequência e conseqüências de um HEAF. Também são apresentadas frequências atualizadas de ignição de incêndio e probabilidades de não supressão, para uso em análises probabilísticas de risco de incêndio (NRC, 2023a).

Uma das propostas de alteração presentes na NUREG-2262 (NRC, 2023a) inclui a segmentação do sistema de distribuição elétrica das usinas nucleares em áreas sujeitas a eventos HEAF. Além disso, a EPRI realizou uma análise em diversas plantas nucleares e observou a ausência de um disjuntor após o gerador principal. Essa configuração comum a diversas plantas, conhecida como projeto conectado à unidade, é um ponto relevante, visto que em algumas situações de acidente, o gerador principal continuou alimentando um HEAF por vários segundos devido à inexistência de um disjuntor que pudesse isolar a fonte de energia (gerador principal) da falha durante o processo de desaceleração do gerador (inércia da máquina), antes que a tensão entrasse em colapso. A Figura 18 apresenta as zonas de falha para um arranjo simplificado do Sistema de Distribuição Elétrica (SDE) de uma usina nuclear já com a inclusão do disjuntor do gerador principal.

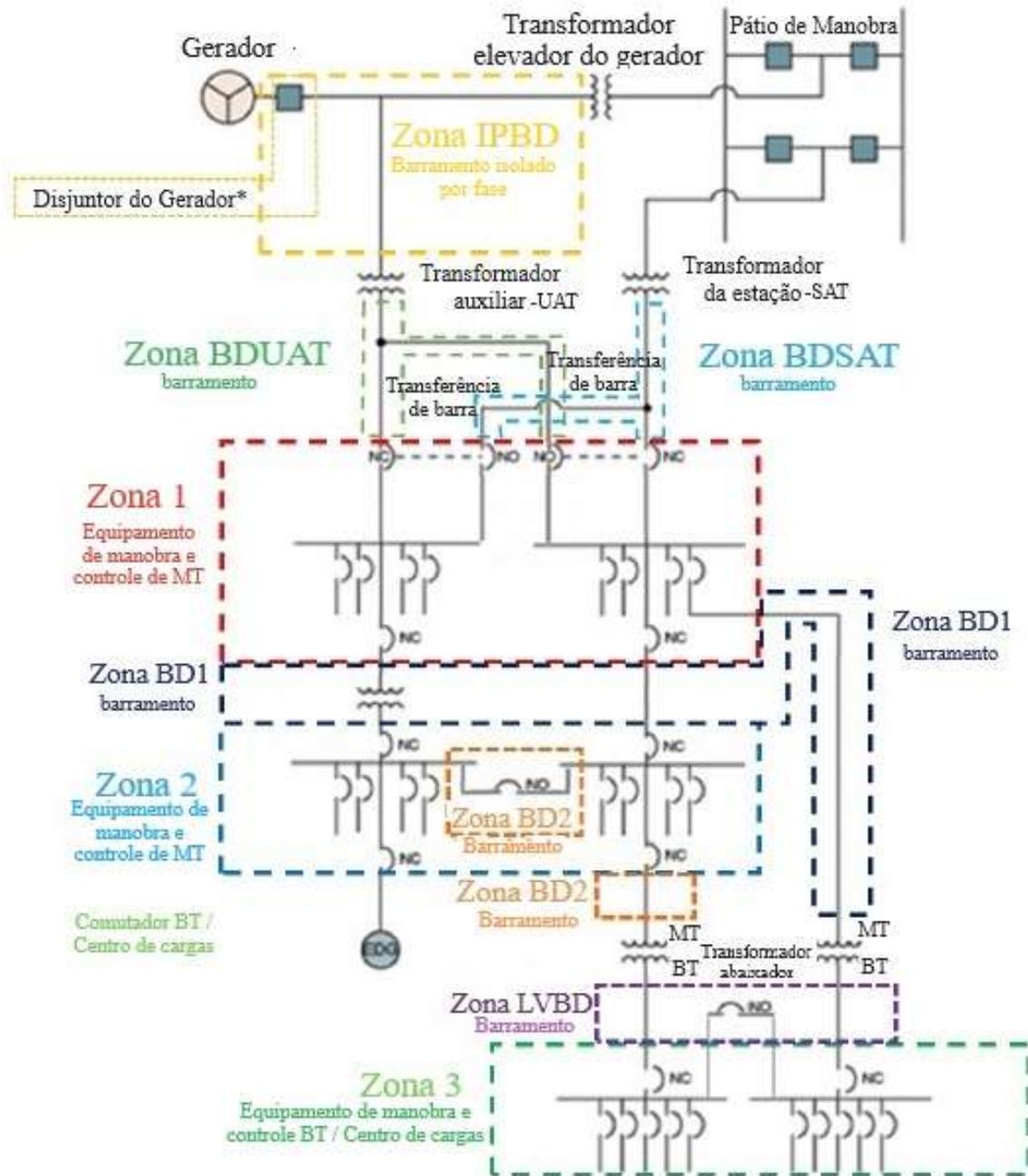


Figura 18 - Zona HEAF - diagrama unifilar de SDE simplificado de usina nuclear. Adaptado de NRC (2023a).

O Suplemento 1 da NUREG/CR-6850 (NRC, 2009) estabeleceu quatro compartimentos para fontes de ignição a fim de abranger a variedade de experiências de HEAF. Nenhuma fonte de ignição específica de HEAF foi adicionada na NUREG-2262 (NRC, 2023a). Contudo, o documento subdividiu a categoria 16.1 em duas novas categorias: 16.1-1 e 16.1-2. A Tabela 4, apresenta a nova categoria e a zona a que todas as categorias estão associadas, conforme mostrado na Figura 18.

Tabela 4 - Zonas HEAF.

zona / HEAF	Parte do Sistema de Distribuição Elétrica	Categoria da fonte de ignição	Equipamento
IPBD	Barramento isolado por fase	16.2	Barramento isolado por fase conectando o gerador da estação ao transformador UAT e GSU. *(UAT - Transformador auxiliar da unidade) *(GSU – Transformador elevador do gerador)
BDUAT	Barramento entre o UAT e a zona 1	16.1-1	Barramento não segregado que conecta os enrolamentos secundários (terciários) do UAT ao primeiro quadro de distribuição a jusante.
BDSAT	Barramento entre o *SAT e a zona 1 *(SAT – Transformador de serviço da unidade)	16.1-1	Barramento não segregado que conecta os enrolamentos secundários (terciários) do SAT ao primeiro quadro de distribuição a jusante. O BDSAT também pode ser usado para representar qualquer circuito de energia externo que suporte a produção de energia a partir de transformadores de serviço de sistema dedicado não mostrados no SDE simplificado na Figura 18.
1	Equipamento de manobra e controle de Média Tensão	16.b	Primeiro quadro a jusante do UAT ou SAT. Também pode ser chamado de “barramento intermediário” se alimentar outro barramento de média tensão a jusante.
2			Segundo barramento do quadro a jusante do UAT ou SAT (através de um barramento intermediário).
3	Centro de Cargas	16.a	Centros de carga ou painéis de BT (480 a 1000 VCA).
BD1	Duto de barramento de média tensão entre zona 1 e zona 2 e zona 1 e zona 3	16.1-2	Região do NSBD de média tensão entre o primeiro quadro de distribuição de média tensão e qualquer um dos seguintes: • O lado de alta do segundo disjuntor de alimentação do barramento do painel de média tensão (barramento da zona 1 para à zona 2) • O lado de alta do transformador do centro de carga (barramento da zona 1 à zona 3)
BD2	Duto de barramento de média tensão entre zona 2 e zona 3 e zona 2 e zona 2	16.1-2	Região do NSBD de média tensão entre o segundo quadro de distribuição de média tensão e qualquer um dos seguintes: • O lado de alta do transformador do centro de carga • outro quadro de distribuição zona 2 (barramento)
LVBD	Barramento de baixa tensão entre zona 1 ou zona 2 para zona 3, ou zona 3 para zona 3	16.1-2	Região do NSBD baixa tensão entre o transformador abaixador da zona 1 e o centro de carga (zona 1 ou zona 2 a zona 3) ou entre centros de carga (zona 3 a zona 3).

Adaptado de NRC (2023a).

4.1.17.1. Categoria 16.A: HEAF Para Painéis De Baixa Tensão (480–1000 VCA)

A NUREG/CR-6850 (NRC, 2009) orienta os analistas a contar a probabilidade de ignição por seção vertical, assumindo que cada seção possui igual chance de ignição. No entanto, a nova orientação da NUREG-2262 modifica essa abordagem. Agora, a probabilidade de ignição HEAF em centros de carga não é mais calculada por seção vertical. A recomendação é considerar na contagem apenas os disjuntores de alimentação, pois é a localização mais propensa a eventos HEAF. Isso se baseia no histórico operacional dos EUA, onde nenhum evento HEAF foi registrado no compartimento principal do barramento do centro de carga. Os únicos dois incidentes HEAF de baixa tensão ocorreram nas conexões de cobre dos disjuntores (NRC, 2023a).

É relevante destacar que a NUREG/CR-6850 apresenta uma abordagem mais conservadora e, conforme mais conhecimento foi sendo adquirido nas fases 1 e 2, e finalmente com a NUREG-2262, o processo de contagem de ignição se torna mais realista.

A orientação revisada oferece uma distribuição mais precisa da frequência 16.a, refletindo melhor a probabilidade real de ocorrência de eventos HEAF, dado que os centros de carga geralmente possuem pelo menos um, e possivelmente dois, cubículos de alimentação em todo o conjunto de manobra (EPRI, NRC, 2023). As Novas frequências de ignição são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação temporal de estimativas de frequência de ignição de incêndio HEAF

Categoria	Localização	Fonte de ignição	Frequência de ignição de incêndio		
			NUREG/CR-6850	NUREG - 2169	NUREG - 2262
16.a	Componentes de toda a planta	HEAF para painéis elétricos de baixa tensão (480-1000V)	4,80E-04	1,52E-04	5,32E-04
16.b	Componentes de toda a planta	HEAF para painéis elétricos de média tensão (> 1000V)	1,40E-03	2,13E-03	1,98E-03
16.1-1*	Componentes de toda a planta	HEAF para barramentos segmentados (Zonas BDUAT e BDSAT)	** 1,27E-03	** 1,10E-03	2,61E-03
16.1-2*	Componentes de toda a planta	HEAF para barramentos segmentados (Zonas BD1, BD2 e BDLV)			8,98E-04
16.2	Componentes de toda a planta	HEAF para barramento isolado por fase	8,24E-04	5,91E-04	1,01E-03

Tabela adaptada das normas: NUREG-2169 e NUERG-2262 (NRC, 2015, 2023a).

* Na NUREG/CR 6850 e na NUREG-2169 existia apenas o item 16.1 (HEAF para barramentos segmentados). Na NUREG-2262 esse item foi dividido em 16.1-1 e 16.1-2.

** Como antes só havia a categoria 16.1 e não se fazia diferença entre zonas, a frequência de ignição de incêndio era apenas uma para barramentos segmentados, a divisão só existe a partir da NUREG-2262.

4.1.17.2. Categoria 16.b: HEAF para painéis MT (> 1000 VCA)

Assim como na categoria 16.a, a NUREG/CR-6850 (NRC, 2005) instruíu os analistas a calcular a probabilidade de ignição por seção vertical. No entanto, a NUREG-2262 (NRC, 2023a) mudou essa orientação para os painéis de média tensão (MT), indicando que não devem mais ser contados por seção vertical. Com base na análise da experiência operacional, concluiu-se que é mais provável que um HEAF ocorra na seção vertical de alimentação do quadro. Assim, a contagem dos painéis de MT agora é feita com base no número total de painéis, ou seja, um conjunto completo de comutadores é considerado como uma única unidade (ver Figura 19) (EPRI/NRC-RES, 2023).

A categoria 16.b abrange HEAF nas zonas 1 e 2. Depois que todos os comutadores forem contados e atribuídos à Zona 1 ou Zona 2, a frequência de ignição para a Zona 1 é ponderada usando 86% da frequência genérica de ignição de incêndio, enquanto os 14% restantes são atribuídos à Zona 2. A NUREG-2262 (NRC, 2023a) aponta que, com base na experiência operacional (6 de 7 eventos ocorreram na Zona 1), foi atribuído este novo fator de ponderação para refletir onde os eventos são mais prováveis (Zona 1). Assim, para a Zona 1, a frequência de ignição, conforme a Tabela 5 é 1,98E-03 vezes o fator de ponderação de 0,86, resultando em uma frequência de 1,7E-03. Da mesma forma, a frequência de ignição para a Zona 2 é calculada como 1,98E-03 multiplicado por 0,14, resultando em 2,77E-04 (EPRI/NRC-RES, 2023).

Equipamento de Manobra e Controle de MT - Exemplo de contagem HEAF



- NUREG/CR-6850: Contagem = 6
- **NUREG-2262: Contagem = 1**

Figura 19 - Exemplo de contagem de acordo com a NUREG-2262 para painel de MT, adaptado de NRC (2023a).

4.1.17.3. Categoria 16.1-1 e 16.1-2: HEAF para Barramento não Segregado - NSBD

A NUREG-2262 introduziu mudanças significativas em relação à NUREG/CR-6850 ao dividir a Categoria 16.1 em duas categorias genéricas de frequência de ignição de incêndio para barramentos não segregados, com base nas zonas HEAF. Essa separação visa refletir melhor as observações da experiência operacional, onde se constatou que a maioria dos HEAF ocorre em barramentos não segregados (do inglês *Non-Segregated Bus Duct* – NSBD) nas zonas do barramento não segregado entre o UAT e a zona 1 (do inglês *Bus Duct Between UAT and Zone 1* – BDUAT) e barramento não segregado entre o SAT e a zona 1 (do inglês *Bus Duct Between SAT and Zone 1* – BDSAT (NRC, 2023a).

A contagem dos barramentos segregados é baseada no número total de pontos de transição, identificáveis por inspeção visual externa ou por meio de desenhos de construção elétrica da planta. Importante notar que a orientação de contagem para NSBD permaneceu inalterada em relação à NUREG/CR-6850, Suplemento 1.

Para os HEAF que ocorrem nas zonas BDUAT e BDSAT, classificados na frequência de ignição de incêndio da categoria 16.1-1, a principal mudança reside na necessidade de determinar o material do invólucro do barramento inicial (aço ou alumínio) e a fragilidade dos alvos próximos (15 MJ/m² ou 30 MJ/m²). Se o material do invólucro for desconhecido, devem-se usar as ZOI para um invólucro de alumínio (NRC, 2023a).

HEAF que ocorrem nas zonas do duto de barramento de média tensão entre zona 1 e zona 2 e zona 1 e zona 3 (do inglês *bus duct 1* - BD1), Duto de barramento de média tensão entre zona 2 e zona 3 e zona 2 e zona 2 (do inglês *bus duct 2* - BD2) e barramento de baixa tensão entre zona 1 ou zona 2 para zona 3, ou zona 3 para zona 3 (do inglês *Low Voltage Bus Duct* – LVBD) estão classificados na frequência de ignição de incêndio da categoria 16.1-2. Assim como na categoria 16.1-1, é necessário determinar o material do invólucro do barramento inicial e a fragilidade dos alvos próximos. Novamente, se o material do invólucro for desconhecido, utilizam-se as ZOI para um invólucro de alumínio (NRC, 2023a).

A frequência de ignição para 16.1-1 e 16.1-2 pode ser vista na Tabela 5.

4.1.17.4. Categoria 16.2: HEAF para Barramentos Isolados por Fase - IPBD

HEAF em dutos de barramento isolados por fase estão situados na zona HEAF IPBD. Este tipo de duto é caracterizado por ter os barramentos de cada fase fechados separadamente em seu próprio invólucro de proteção, formando dutos de barramento segregados. O uso primário dos barramentos isolados por fase é geralmente limitado à conexão do gerador principal aos transformadores principal e auxiliar (NRC, 2023a).

Em relação à orientação de contagem para o compartimento 16.2, a NUREG-2262 recomenda continuar utilizando a orientação do NUREG/CR-6850, Suplemento 1. A ZOI continua a ser considerada como uma esfera centrada em um ponto de falha, com um raio de 1,52 metros (NRC, 2023a).

A frequência de ignição para 16.2 pode ser vista na Tabela 5.

4.1.17.5. Evolução da Frequência de Ignição

Os períodos para contagem de eventos apresentados na Tabela 5 diferem dos períodos da NUREG/CR-6850 e NUREG-2169. A NUREG-2262 apresenta as frequências de ignição de incêndio atualizadas até o ano de 2021. Na NUREG-2169, os dados foram atualizados para determinar a frequência das categorias com a inclusão do número de eventos que ocorreram até 2009. Na NUREG/CR-6850, com relação a eventos HEAF, os períodos usados para determinar a frequência das categorias foram determinados pelo número de eventos que ocorreram de 1979 a 2001 (EPRI/NRC-RES, 2005, NRC, 2015, 2023a).

Com relação a Tabela 5 pode-se observar que as frequências médias para as categorias 16.a (HEAF para gabinetes elétricos de baixa tensão) e 16.2 (HEAF para barramentos isolados por fase) apresentaram um aumento em comparação aos valores médios expostos no NUREG-2169. Especificamente, as frequências médias para as categorias 16.a e 16.2 elevaram-se em 250% e 71%, respectivamente. Esse aumento expressivo no compartimento 16.a é atribuído ao pequeno número de eventos de incêndio registrados na experiência industrial do NUREG-2169, aliado a um evento adicional ocorrido após a publicação do NUREG-2169 onde o impacto da adição ou remoção de um único evento se torna mais perceptível. Por outro lado, a frequência do compartimento 16.b registrou uma redução de 7%. A segmentação da frequência do barramento resultou em um aumento de 137% na frequência para o compartimento 16.1-1 e uma diminuição de 18% para o compartimento 16.1-2, em relação à média combinada anterior do compartimento 16.1.

5. NORMAS E REGULAMENTAÇÕES MUNDIAIS

5.1. ALEMANHA

O quadro regulamentar para centrais nucleares na Alemanha é predominantemente determinista, englobando uma vasta gama de documentos regulamentares, tais como requisitos de segurança, orientações e recomendações emitidas por órgãos reguladores e consultivos. Esse conjunto de normas e regras de segurança nuclear é integrado em uma estrutura jurídica bem definida. Em 2013, houve uma atualização significativa na regulamentação nuclear alemã com a promulgação dos "Requisitos de Segurança para Centrais Nucleares" de última geração. Essas atualizações incluíram melhorias substanciais na consideração de perigos internos, como incêndios, especialmente em relação às combinações de eventos de incêndio e outros incidentes previstos, como o HEAF, ressaltando a necessidade de uma concepção adequada de proteção contra incêndios (RÖWEKAMP, BERG, 2013).

As normas atualizadas enfatizam demonstrações de segurança através de avaliações determinísticas e probabilísticas mais detalhadas. No contexto de segurança contra incêndios e explosões, quatro normas alemãs de segurança nuclear, elaboradas pela Comissão de Normas de Segurança Nuclear (Kerntechnischer AuSEChuss, KTA) (RÖWEKAMP, BERG, 2013), são particularmente relevantes:

- 1 . KTA 2101.1: Proteção contra Incêndios em Usinas Nucleares, Parte 1: Requisitos Básicos.
- 2 . KTA 2101.2: Proteção contra Incêndio em Usinas Nucleares, Parte 2: Proteção contra Incêndio de Componentes Estruturais de Usinas.
- 3 . KTA 2101.3: Proteção contra Incêndio em Usinas Nucleares, Parte 3: Proteção contra Incêndio de Componentes Mecânicos e Elétricos.
- 4 . KTA 2103: Proteção contra Explosão em Centrais Nucleares com Reator de Água Leve.

A abordagem alemã reflete um compromisso robusto com a segurança, alinhando-se com práticas e diretrizes internacionais emitidas por organizações como a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Este alinhamento garante que as práticas de segurança estejam em conformidade com os padrões globais e beneficiem-se das mais recentes inovações tecnológicas e metodológicas.

Até o final de 2017, o banco de dados FIRE da OECD registrou 12 eventos de incêndio induzidos por HEAF. Destes, um envolveu um HEAF em um transformador que resultou em incêndio, enquanto outro evaporou cabos subterrâneos em uma extensão superior a um metro. Além disso, mais de 40 eventos de HEAF foram reportados em centrais nucleares alemãs que, apesar de não resultarem em incêndios, apresentaram potencial para deteriorar os recursos de proteção contra incêndio ou, em outras circunstâncias, provocar incêndios subsequentes (KURIENE, RÖWEKAMP, 2019).

Esses incidentes sublinham a importância de considerar eventos HEAF na proteção contra incêndios e explosões em centrais nucleares. Essa necessidade foi um dos principais motivos para incluir as combinações de eventos com HEAF nas normas KTA 2101.1 e KTA 2103, que tratam da proteção contra incêndio e explosão, respectivamente (KURIENE, RÖWEKAMP, 2019).

Historicamente, incidentes como o acidente de Fukushima em 2011 destacaram a necessidade de revisar e fortalecer continuamente as normas de segurança nuclear. A colaboração internacional também desempenha um papel crucial, com a Alemanha participando ativamente em iniciativas globais para aprimorar as práticas de segurança.

5.2. JAPÃO

O terremoto de Tohoku, ocorrido em 11 de março de 2011, destacou a vulnerabilidade das centrais nucleares japonesas a eventos HEAF. O incidente na Central Nuclear de Onagawa, onde dois dos dez setores dos gabinetes elétricos de alta tensão não emergenciais foram afetados, resultou em um incêndio HEAF induzido sismicamente. Esse evento catalisou a urgente necessidade de revisão e aprimoramento das normas regulatórias no Japão (SHIRAI, MIYAGI, et al., 2019).

Em resposta, a NRA iniciou uma série de medidas para entender e mitigar os riscos associados aos eventos HEAF. Desde 2013, a (*Secretariat of Nuclear Regulatory Authority - S/NRA/R*) conduziu testes extensivos nos laboratórios KEMA nos EUA, visando obter conhecimento técnico sobre a progressão de eventos HEAF e os níveis de energia do arco capazes de causar incêndios. Os resultados desses testes serviram de base para o desenvolvimento de novas orientações regulatórias, focadas em métodos de análise de riscos de incêndio associados a HEAF (SHIRAI, MIYAGI, et al., 2019).

Com base no conhecimento adquirido, foram propostas medidas de prevenção e mitigação, incorporadas aos requisitos regulatórios japoneses para a segurança contra incêndios em centrais nucleares. Essas alterações foram formalmente emitidas em 8 de agosto de 2017, entrando em vigor imediatamente (SHIRAI, MIYAGI, et al., 2019).

Os novos requisitos regulatórios para reatores nucleares e suas instalações anexas são mostradas na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 - Situação atual do requisito alterado no Japão (em agosto de 2017).

Normas técnicas para reatores nucleares de geração de energia e suas instalações anexas	
Artigo 45.º	Instalação de fornecimento de energia de segurança.
Termo 3	Para instalações de fornecimento de energia de segurança (instalações de fornecimento de eletricidade a instalações de segurança), incluindo geradores e instalações de energia de emergência, são sempre utilizadas as linhas de energia designadas no parágrafo 1º, e as instalações dos reatores de geração de energia, deverão ser tomadas as seguintes medidas para que o fornecimento de energia elétrica aos equipamentos necessários à garantia da segurança da instalação não seja suspenso.
Item 1	Medidas necessárias para evitar a propagação de danos aos quadros elétricos devido ao HEAF.
Item 2	Além do listado no item anterior, medidas necessárias para detectar danos, falhas ou outras anormalidades no equipamento e evitar sua expansão

Fonte: adaptado de SHIRAI, MIYAGI, et al. (2019).

Os requisitos também destacam a importância de substituir relés de sobrecorrente analógicos por relés digitais, cuja resposta é significativamente mais rápida, melhorando assim a eficácia das medidas contra HEAF (KABASHIMA, KASAHARA, 2017).

No estado atual das operações das centrais nucleares japonesas, a energia de arco nos painéis elétricos importantes para a segurança é rigorosamente controlada, reforçando as contramedidas a incêndios HEAF. As pesquisas e investigações de segurança continuam, e qualquer novo conhecimento obtido será incorporado às normas regulamentares conforme necessário, garantindo que as práticas de segurança evoluam de acordo com os avanços técnicos e as lições aprendidas (KABASHIMA, KASAHARA, 2017).

Essa abordagem proativa e baseada em evidências visa minimizar os riscos associados a eventos HEAF, garantindo a segurança contínua das centrais nucleares no Japão.

5.3. AIEA

A AIEA tem desenvolvido diretrizes e documentos técnicos que abordam vários aspectos de segurança em instalações nucleares. Estes documentos fornecem orientações específicas, garantindo que as instalações nucleares mantenham altos padrões de segurança e minimizem os riscos. Dentre os inúmeros documentos publicados, os que citam diretamente o HEAF são o SSG-64, SSG-3, IAEA TECDOC-1944 e o SSV-19. Estes serão discutidos a seguir.

5.3.1. SSG-64: PROTEÇÃO CONTRA PERIGOS INTERNOS NO PROJETO DE CENTRAIS NUCLEARES

O SSG-64 (IAEA, 2021b) fornece recomendações sobre avaliação de perigos (inclusive para combinações de perigos) e conceitos de projeto para proteção contra riscos internos no projeto de usinas nucleares. Nesse Guia de Segurança foram revisados os perigos internos relacionados a incêndios, explosões, mísseis, rupturas de tubulações, inundações, colapso de estruturas e queda de objetos com foco em queda de carga pesada, interferência eletromagnética e liberação de substâncias perigosas originadas dentro dos limites do local. O guia faz menção ao HEAF na seção referente a identificação e caracterização de riscos de explosão, mais especificamente nos itens 4.61 e 4.75. A abordagem preventiva é enfatizada, buscando minimizar a probabilidade de ocorrência e limitar as consequências dos perigos citados.

5.3.2. SSG-3: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE APS NÍVEL 1 PARA USINAS NUCLEARES

O SSG-3_REV.1 (IAEA, 2024) aborda o desenvolvimento e a aplicação de avaliações de segurança probabilísticas de nível 1 para usinas nucleares. No contexto do evento HEAF, esse documento destaca a importância de incluir eventos de falha de arco de alta energia nas análises de risco e na modelagem probabilística. A inclusão de HEAF nas avaliações de segurança permite uma melhor compreensão dos possíveis impactos e a implementação de medidas de mitigação mais eficazes. O documento enfatiza a necessidade de uma avaliação abrangente que considere todas as possíveis fontes de falhas internas, incluindo HEAF, fazendo menção ao mesmo na seção referente a análise de cenários de incêndio, item 7.51, subitem f. Também é citado na seção que trata de

análise de explosão interna, item 7.128: a recomendação para a realização da Análise Probabilística de Segurança (APS) de Nível 1 para riscos internos deve ser adaptado para um APS de Nível 1 para explosões internas, e deve considerar possíveis causas ou fontes de explosão, como falhas de arco elétrico de alta energia.

5.3.3. AIEA TECDOC-1944: PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO EM USINAS NUCLEARES

A AIEA TECDOC-1944 (IAEA, 2021a) aborda a proteção contra incêndios em usinas nucleares. Esse documento técnico fornece orientações detalhadas sobre a implementação de sistemas de prevenção e combate a incêndios que podem ser desencadeados por HEAF. Ele também discute a importância de avaliações de risco específicas e a integração de estratégias de proteção contra incêndios no projeto e operação das usinas nucleares. A menção ao HEAF consta na seção referente a sistemas de proteção contra incêndio, no item 3.2.3, onde é ressaltada a existência do perigo e a preocupação com a sua mitigação, sendo também enfatizada a experiência internacional na utilização de relés digitais para a redução do risco de incêndio.

5.3.4. DIRETRIZES DO IRS - EDIÇÃO 2022

Esse documento substituiu o SSV-19, parte da série de serviços da AIEA, que tem como principal objetivo descrever o sistema de relatório internacional, do inglês (*International Reporting System - IRS*), operado pela AIEA e pela OECD, aprimorar a segurança das usinas nucleares globais, por compartilhamento de lições aprendidas de incidentes ocorridos durante todas as fases das usinas nucleares, desde a construção até o descomissionamento (AIEA, 2022).

O documento descreve o IRS, oferecendo orientações práticas e antecedentes fornecidos pelos Estados-Membros, para ajudar a prevenir a recorrência de eventos semelhantes. O HEAF é mencionado nas categorias 3, 5, e 8. Na seção nomeada “categoria 3: Deficiências na avaliação de segurança”, subitem c, onde é relatado um acidente que envolve erro humano. Na categoria 5, denominada “execução e ações consequenciais tomadas pelo órgão regulador”, subitem d, são resumidas as atividades da NRC e da OECD relativos aos eventos HEAF. Na categoria 8, intitulada "Outras descobertas e informações da experiência prática", ressalta-se que os riscos de um HEAF podem ser significativamente maiores nos equipamentos que possuam componentes de

alumínio em comparação com os que possuem apenas componentes de cobre (IAEA, 2022).

5.4. EUA - NRC

Os regulamentos, orientações regulatórias e filosofia de defesa em profundidade elaboradas pela NRC têm o objetivo de assegurar a proteção adequada à saúde e segurança públicas contra as consequências de incêndios em instalações nucleares. Os eventos HEAF têm o potencial de causar danos severos em instalações nucleares, devido a isso a NRC tem se empenhado em entender esse evento e a evolução das suas regulamentações reflete o progresso contínuo na compreensão dos riscos associados aos HEAF e na implementação de medidas para mitigar esses riscos.

No início dos anos 2000, com a publicação do relatório NUREG/CR-6850, que é um marco importante nas iniciativas da NRC para abordar os riscos de incêndio em instalações nucleares, incluindo aqueles causados por HEAF, a NRC analisou lições aprendidas de incidentes passados e iniciou um esforço com parceria internacional da OECD para aprimorar a segurança contra incêndios através do compartilhamento de conhecimento operacional. Essa colaboração resultou numa série de testes realizados nos Estados Unidos entre 2014 e 2017 para apoiar revisões e melhorias nos métodos existentes de risco de incêndio (TAYLOR, G., HAMBURGER, et al., 2019).

Recentemente, a NRC lançou a NUREG-2262, que introduz mudanças significativas em relação à metodologia anterior, refletindo avanços no entendimento dos HEAF. Esse documento, aborda de forma mais detalhada os mecanismos de falha e as consequências dos HEAF, incorpora novos dados experimentais e experiências operacionais para fornecer uma base mais robusta para a avaliação e mitigação dos riscos associados aos HEAF (NRC, 2023a).

Além dessas publicações, a NRC tem conduzido várias iniciativas para aprofundar o entendimento dos HEAF e melhorar a segurança das instalações nucleares. Estudos contínuos e colaboração com outras agências internacionais, como a OECD do qual é membro, têm sido fundamentais para o desenvolvimento de práticas regulatórias robustas. A NRC também promove a troca de informações e lições aprendidas através de *workshops*, conferências e publicações técnicas.

A NRC em suas comunicações, (*information notice* - IN), informa aos licenciados sobre acidentes, testes e outros, e espera-se que os licenciados revisem as informações

fornecidas no aviso informativo, no que se refere à experiência operacional para aplicabilidade às suas instalações e considerem quaisquer ações, conforme apropriado. Contudo, é ressaltado que a IN não deve ser interpretada como exigindo ação específica, pois as centrais nucleares dos EUA licenciadas sob 10 CFR 50 não são obrigadas a desenvolver APR de incêndio. No entanto, os licenciados que optam por adotar certos programas voluntários informados por risco, como os “tempos de conclusão informados por risco” e a base de licenciamento de proteção contra incêndio baseada em “desempenho informada por risco” sob o 10 CFR 50.48(c) (NFPA 805), desenvolvem APR de incêndio para obter aprovação da equipe da NRC para estabelecer e implementar esses programas. Ou seja, embora não seja obrigatório, as usinas nucleares nos EUA que optam por participar de programas voluntários informados por risco precisam desenvolver APR de incêndio para obter aprovação regulatória. Essas APR devem ser mantidas atualizadas para refletir a situação real das plantas nucleares (NRC, 2023b).

5.5. BRASIL – NORMA CNEN NN 2.03

A norma CNEN NN 2.03 (CNEN, 1999), intitulada "Proteção Contra Incêndio em Usinas Nucleoelétricas", estabelece os critérios gerais e requisitos para proteger contra incêndios nas fases de projeto, construção e operação de usinas nucleares. O principal objetivo é prevenir a ocorrência de incêndios, neutralizar sua propagação e mitigar suas consequências, visando manter as funções de segurança da usina. A aplicação da norma abrange tanto as estruturas permanentes da usina durante a construção quanto as áreas de estocagem de elementos combustíveis e a área protegida da usina na fase operacional.

Os principais pontos incluem:

1. Defesa em Profundidade: implementa uma abordagem na prevenção, detecção e combate rápido aos incêndios, bem como controle eficaz para manter a segurança em caso de falha dos níveis iniciais de defesa.
2. Análise de incêndio (AI): a norma orienta que uma análise detalhada deve ser realizada para cada zona de avaliação, identificando itens importantes à segurança, calculando a duração do incêndio postulado e avaliando as consequências para elementos críticos da usina.

3. Planos de Proteção contra Incêndio:

- Plano Preliminar de Proteção contra Incêndio (PPPI): focado na fase de construção e aborda as medidas de proteção necessárias nas áreas de construção.
 - Plano de Proteção contra Incêndio (PPI): aplicado na operação, a partir do recebimento dos elementos combustíveis. Abrange sistemas de detecção, alarme, extinção de incêndios, barreiras corta-fogo, iluminação de emergência e procedimentos operacionais.
4. Prevenção de Incêndio: controle de materiais combustíveis, trabalhos a quente, alternativas para situações de deficiência de sistemas e garantia de posicionamento adequado de portas corta-fogo.
 5. Detecção e Alarme de Incêndio: a norma exige sistemas automáticos em áreas críticas, com atuação de detecção e alarme em locais permanentemente assistidos. Um sistema de acionamento para as brigadas e alarme de evacuação também é necessário.
 6. Combate a Incêndio: de acordo com a norma, os sistemas de extinção devem utilizar água como agente principal, exceto em casos justificados na AI. Há requisitos específicos para capacidade e redundância dos sistemas de água de incêndio.
 7. Requisitos Técnicos: a norma recomenda que sejam incluídas barreiras corta-fogo, sistemas de comunicação redundantes e análises de impacto das modificações no projeto para proteção contra incêndios.
 8. Brigadas de Incêndio: é especificada a organização, composição, treinamento e funções das brigadas durante diferentes fases e áreas da usina.

Em síntese, a norma CNEN NN 2.03 estabelece uma abordagem integrada para a proteção contra incêndios em usinas nucleares, cobrindo desde a prevenção e detecção até medidas de resposta e confinamento, sempre com foco na segurança operacional e na mitigação de riscos a pessoas e ao ambiente.

6. RESULTADOS

Apesar da crescente preocupação internacional com os eventos HEAF em instalações nucleares, após levantamento realizado, não foi identificada nenhuma norma específica ou proposta de regulamentação para o tratamento desses fenômenos no Brasil. A ausência de diretrizes nacionais evidencia uma lacuna significativa no arcabouço regulatório brasileiro, especialmente considerando o potencial impacto dos HEAF na segurança e operação de centrais nucleares. Essa falta de regulamentação dificulta a adoção de medidas preventivas e pode comprometer a integridade das instalações.

6.1. CONSEQUÊNCIAS DA AUSÊNCIA DE REGULAMENTAÇÃO ESPECÍFICA PARA O HEAF

A seguir, são elencadas 4 consequências da ausência de regulamentação para as plantas nucleares, que afetam direta e indiretamente na segurança:

- I. Segurança Operacional: sem regulamentações específicas, as práticas de segurança podem variar entre as diferentes plantas nucleares, resultando em níveis desiguais de proteção contra HEAF.
- II. Padronização de Procedimentos: a ausência de normas impede a padronização de procedimentos de resposta e mitigação, o que pode levar a uma resposta ineficaz em caso de um evento HEAF.
- III. Avaliação de Riscos: a falta de diretrizes claras dificulta a avaliação precisa dos riscos associados a HEAF, resultando em possíveis subestimações ou superestimações dos perigos envolvidos.
- IV. Adoção de Tecnologias Avançadas: sem regulamentações que incentivem ou exijam o uso de tecnologias específicas para detectar e mitigar HEAF, pode haver um atraso na adoção de inovações tecnológicas que melhorariam a segurança das plantas nucleares.

6.2. PROPOSTA INICIAL DE REGULAMENTAÇÃO PARA O HEAF NO BRASIL

Reitera-se que a ausência de uma regulamentação específica para HEAF no Brasil representa uma lacuna na proteção das instalações nucleares. Uma estratégia para preencher essa lacuna seria adotar, inicialmente, uma regulamentação internacional

reconhecida, como as normas da NRC, levando-se em consideração a afinidade nacional a essas normativas e, posteriormente, revisar a normativa nacional existente e desenvolver uma regulamentação específica para HEAF. De modo geral, essas regulamentações devem contemplar as seguintes medidas:

- Estabelecer critérios claros para a identificação e avaliação de riscos associados a HEAF.
- Definir requisitos de projeto e operação para minimizar a ocorrência e os impactos de HEAF.
- Promover a padronização de procedimentos de resposta e mitigação de HEAF.
- Incentivar a adoção de tecnologias avançadas de detecção e prevenção.

Ademais, a colaboração com organizações internacionais e a adaptação de melhores práticas globais podem aprimorar o marco regulatório brasileiro, contribuindo para a segurança e a sustentabilidade das operações nucleares no país.

6.3. POSSÍVEIS ADEQUAÇÕES DAS NORMAS INTERNACIONAIS AO CONTEXTO BRASILEIRO

Nesta seção, serão discutidas algumas das práticas e padrões reconhecidos globalmente propostas para adoção na legislação brasileira, visando o aprimoramento do arcabouço regulatório e o fortalecimento da segurança.

Práticas regulatórias internacionais relacionadas ao HEAF:

- Alemanha: a inclusão de eventos HEAF nas normas KTA 2101.1 e KTA 2103, que tratam da proteção contra incêndio e explosão, reflete a preocupação em mitigar os riscos associados a falhas de arco de alta energia.
- AIEA: diretrizes como o SSG-3 e o SSG-64 enfatizam a necessidade de incluir eventos HEAF na análise de cenários de incêndio e na modelagem probabilística de risco, reforçando a importância de avaliar tais eventos nas análises de segurança de plantas nucleares.
- Estados Unidos: o tratamento inicial dos eventos HEAF, como observado nos outros países, surge na regulamentação que estabelece métodos de avaliação probabilística de risco de incêndio, NUREG/CR-6850. Contudo, avanços nas pesquisas levaram à publicação da NUREG-2262, dedicada exclusivamente ao HEAF, detalhando critérios técnicos e medidas preventivas.

- Japão: conforme apresentado na Tabela 6, o Japão adota medidas rigorosas para controlar a energia de arco nos painéis elétricos essenciais à segurança, reforçando as contramedidas para prevenção de incêndios causados por HEAF.

A Tabela 7 apresenta de forma resumida os países que estão incluindo o tema HEAF em suas regulamentações.

Tabela 7 - Medidas adotadas por países para mitigação de eventos HEAF

País ou Bloco	Medida Adotada	Normas ou Diretrizes Associadas	Observações
Alemanha	Implementação de manutenção preventiva e preditiva; análise de riscos detalhada.	Diretrizes da KTA (Autoridade Reguladora Nuclear Alemã)	Exemplos de falhas em instalações nucleares reforçam a importância dessas medidas.
Japão	Atualização de normas de segurança após Onagawa; foco em falhas elétricas críticas.	Diretrizes da NRA (Autoridade Reguladora Nuclear Japonesa).	Reforçou requisitos para painéis importantes para a segurança e recomendou a troca de componentes elétricos antigos por digitais.
Estados Unidos	Elaboração de estudos específicos sobre HEAF; recomendação de tempos de resposta reduzidos.	NUREG-2262; NUREG/CR-6850.	NUREG-2262 enfatiza redução do tempo de eliminação de falhas e estratégias de mitigação proativas.
Brasil	(Sem medidas específicas até o momento).	—	Proposta de revisão da CNEN NN 2.03 e emissão de Resolução para incorporar adequações internacionais.
Países membros da OECD	Acesso às publicações e recomendações da OECD sobre HEAF; uso como referência técnica.	Publicações da OECD/NEA.	Inclui 34 países membros que utilizam as diretrizes como base para avaliações e planejamento.

Foi observado que a maioria dos requisitos relacionados a HEAF está associada às diretrizes de proteção contra incêndio. No Brasil, as principais regulamentações de segurança nuclear são estabelecidas pela CNEN e complementadas pelos guias da IAEA e normas internacionais, em geral sendo usadas as normas da NRC. Especificamente sobre proteção contra incêndio, o documento de referência nacional é a norma CNEN NN 2.03 (CNEN, 1999), que aborda a proteção contra incêndios em usinas nucleoeletricas.

Portanto, como primeiro passo, recomenda-se uma revisão da CNEN NN 2.03 para a inclusão de requisitos específicos relacionados a incêndios decorrentes de eventos HEAF, alinhando a regulamentação brasileira às práticas internacionais e garantindo uma abordagem mais abrangente para a segurança das instalações.

Reconhece-se, entretanto, que o processo de revisão de uma norma pode ser demorado e complexo, envolvendo múltiplas etapas de análise e aprovação. Nesse contexto, uma solução possível para essa questão seria a emissão de uma Resolução pela CNEN, que tem força de lei e é publicada no Diário Oficial, como uma alternativa mais eficiente e prática para incorporar as adequações das normas internacionais à CNEN NN 2.03.

Essa Resolução também deverá abordar a adoção de procedimentos operacionais específicos voltados à mitigação de eventos HEAF pelas próprias usinas.

Como exemplo prático, propõe-se a elaboração de um mapeamento de riscos para os sistemas elétricos das instalações existentes, por exemplo, Angra I e II, que consiste em criar um processo sistemático para identificar, avaliar e mitigar os riscos associados aos sistemas elétricos das instalações nucleares, com foco no HEAF. O mapeamento de riscos envolveria as seguintes etapas:

1. Identificação dos componentes críticos que possam estar sujeitos a falhas de arco elétrico, como transformadores, painéis de distribuição, cabos de potência, geradores, além de verificar a presença de alumínio nos equipamentos, pois conforme mencionado por KABASHIMA, KASAHARA, (2017), esses equipamentos apresentaram danos significativamente maiores do que os previstos nos modelos atuais de HEAF.
2. Análise de vulnerabilidades que deverá ser realizada a partir da identificação dos componentes. Nessa análise serão avaliados parâmetros como a idade do equipamento, manutenções anteriores, condições operacionais (sobrecarga, exposição a calor, umidade etc.) e histórico de falhas. A análise pode ser

complementada com ferramentas de avaliação como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), HAZOP (*Hazard and Operability Study*) (NRC, 2023a).

3. Classificação de riscos que será elaborada com base nas vulnerabilidades identificadas: cada risco, onde a classificação é feita em termos de probabilidade de ocorrência e severidade do impacto. Essa classificação ajuda a priorizar ações preventivas e de mitigação. A matriz de riscos pode ser utilizada para orientar essa classificação, considerando fatores como a frequência de falhas históricas e a criticidade do sistema.
4. Redundância, melhorias e manutenção:
 - Incluir, caso não haja, um disjuntor após o gerador principal evitando a ocorrência de eventos mais graves pela redução do tempo de eliminação de falhas como recomendado no documento NRC, (2023a).
 - Melhoria dos sistemas de proteção elétrica (ex.: substituição de relés analógicos por digitais, com objetivo de reduzir esses tempos de eliminação de falha. (KABASHIMA, KASAHARA, 2017)).
 - Manutenções preventivas e preditivas mais frequentes e abrangentes, baseadas em dados históricos e condições atuais de operação (ex.: limpeza de barramentos e painéis evitando o acúmulo de poeira e detritos. (BERG, Heinz Peter, RÖWEKAMP, 2011))

6.4. DESAFIOS E CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

Para as propostas apresentadas, deve -se considerar que alguns potenciais obstáculos provavelmente se apresentarão como, por exemplo, a necessidade de revisão normativa na CNEN, que requer horas de estudo das normativas internacionais e custo com alocação de mão de obra para realizar a tarefa. Após essas etapas, ainda seria necessária uma consulta pública e, por fim, ajustes nos requisitos de segurança. Também deve-se levar em conta os custos de implementação e atualizações nas plantas com mais de 20 anos. Por último pode-se destacar a resistência a mudanças regulatórias por parte dos operadores e da própria indústria.

7. CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação ressaltou a necessidade de uma regulamentação consistente e específica para HEAF, apoiada em dados empíricos e nas melhores práticas internacionais, como um elemento essencial para a segurança e resiliência das instalações nucleares brasileiras. Partindo de análises detalhadas, foi desenvolvido um conjunto de propostas para a adaptação do arcabouço regulatório nacional, buscando alinhar-se às diretrizes internacionais e às condições específicas do Brasil.

A implementação desta proposta contribuirá significativamente para a segurança e resiliência das instalações nucleares, garantindo que as medidas preventivas e de mitigação sejam eficazes contra os riscos associados a HEAF. Entre as ações sugeridas, destaca-se a emissão de uma Resolução pela CNEN, como um mecanismo mais eficiente e viável para incorporar as adequações das normas internacionais à CNEN NN 2.03. Esta abordagem, além de preencher lacunas regulatórias, viabiliza a rápida implementação de procedimentos operacionais específicos para mitigação de eventos HEAF.

Embora tenham sido apresentadas diretrizes para mitigar os riscos associados a eventos HEAF, propôs-se a revisão da norma nacional CNEN NN 2.03, como um objetivo de longo prazo, complementando as ações imediatas que podem ser implementadas via Resolução, criando assim uma base sólida para futuras regulamentações específicas.

As práticas regulatórias adotadas por países e instituições como Alemanha, Japão, Estados Unidos e principalmente as diretrizes da OECD serviram como referencial para destacar a evolução normativa global e demonstrar a relevância de estratégias preventivas e de mitigação. Entre as medidas discutidas, ressalta-se, de forma geral pela NUREG-2262, a importância na redução dos tempos de eliminação de falhas, buscando reduzir a gravidade dos eventos HEAF, visto que o tempo é um dos fatores decisivos na intensidade destes eventos. Foi igualmente apontada como indispensável a manutenção preventiva e preditiva, reforçando que falhas em sua execução podem aumentar significativamente os riscos, como exemplificado em estudos de acidentes em instalações nucleares alemãs. (BERG, Heinz Peter, RÖWEKAMP, 2011)

Dentre as contribuições deste trabalho, destaca-se:

- O aprofundamento na análise das normas e diretrizes internacionais relevantes, promovendo uma visão comparativa entre diferentes abordagens regulatórias;

- A introdução do tema HEAF na discussão nacional no âmbito nuclear, um evento que vem sendo debatido internacionalmente, mas ainda pouco explorado no Brasil. Esta iniciativa contribui para sensibilizar a comunidade técnica e regulatória brasileira quanto à necessidade de abordar os riscos associados a HEAF de forma sistemática.
- A identificação de lacunas no arcabouço normativo brasileiro e a proposição de adaptações que possam fortalecer a segurança nuclear do país.

7.1. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Para avançar no entendimento e na mitigação dos riscos associados aos eventos HEAF, sugere-se como linhas de pesquisas futura:

1. Definição de uma norma específica para HEAF: Desenvolver uma regulamentação detalhada que inclua critérios técnicos, medidas preventivas e requisitos de mitigação;
2. Mapeamento de riscos em sistemas elétricos existentes: Realizar estudos para identificar vulnerabilidades específicas relacionadas a HEAF nas instalações nucleares brasileiras.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMMERMAN, R. F., GAMMON, T., SEN, P., *et al.* **COMPARATIVE STUDY OF ARC MODELING AND ARC FLASH INCIDENT ENERGY EXPOSURES.** . [S.l: s.n.], 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4664001>. Acesso em: 15 fev. 2024.

ARMIJO, K. M., JOHNSON, J., HARRISON, R. K., *et al.* **SANDIA REPORT Arc-Fault Primer: Numerical, Analytical, and Experimental Characteristics of Initiation and Sustainment of Arc Plasmas (DRAFT).** . [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: <http://www.ntis.gov/search>. Acesso em: 4 jun. 2023.

BERG, H. P., RÖWEKAMP, M., "Investigation of High Energy Arcing Fault Events in Nuclear Power Plants". [S.l: s.n.], 2011. . DOI: 10.5772/20497. Disponível em: www.intechopen.com. Acesso em: 14 jan. 2023.

BERG, H.-P., FRITZE, N., RÖWEKAMP, M., *et al.* **CONSIDERATION OF EVENT COMBINATIONS OF FIRES AND OTHER EVENTS IN FIRE PRA-INSIGHTS FROM THE OECD FIRE DATABASE.** . [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: https://iapsam.org/PSAM13/program/Abstract/SpecialSession/SS1_2.pdf. Acesso em: 14 jan. 2023.

BROWN, J. W., NOWLEN, S. P., WYANT, F. J. **SANDIA REPORT High Energy Arcing Fault Fires in Switchgear Equipment, A Literature Review.** . [S.l: s.n.], 1 out. 2009. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/972462>. Acesso em: 4 jul. 2023.

CHOONG-KOO, C. "Mitigation of high energy arcing faults in nuclear power plant medium voltage switchgear", **Nuclear Engineering and Technology**, v. 51, n. 1, p. 317–324, 1 fev. 2019. DOI: 10.1016/j.net.2018.08.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573318300615>. Acesso em: 14 jan. 2023.

CNEN. **O Que é o RMB - Reator Multipropósito Brasileiro — Comissão Nacional de Energia Nuclear.** 9 nov. 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/rmb/o-que-e-o-rmb-reator-multiproposito-brasileiro>. Acesso em: 4 jul. 2024.

CNEN. **PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO EM USINAS NUCLEOELÉTRICAS. CNEN NN 2.03.** . [S.l: s.n.], set. 1999. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-2/grupo2_nrm203.pdf. Acesso em: 9 out. 2024.

CNEN. **Sobre a CNEN**. 5 maio 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/sobre-a-cnen#:~:text=%C3%93rg%C3%A3o%20superior%20de%20planejamento%2C%20orienta%C3%A7%C3%A3o,da%20energia%20nuclear%20no%20Brasil>. Acesso em: 15 jul. 2024.

COYNE, K., MELLY, N., HAMBURGER, K., *et al.* "Overview of U.S. Nuclear Regulatory Commission Research Activities to Update Probabilistic Risk Treatment of High Energy Arcing Faults. In: SMIRT 26 17th International Seminar on FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS, 2022.". 24 out. 2022. **Anais** [...] Westerburg, [s.n.], 24 out. 2022. p. 67–79. Disponível em: <https://www.grs.de/sites/default/files/2023-02/GRS-705.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2024.

DAS, J. C. **Arc flash hazard analysis and mitigation**. Second ed. [S.l.], IEEE, 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/book/9296418>. Acesso em: 11 out. 2023.

DE BORBA, M. L., HOELTGEBAUM, M., SILVEIRA, A. **A produção científica em empreendedorismo: análise do academy of management meeting: 1954-2005**. . [S.l: s.n.], 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ram/a/fqnWH9nmPMshw7LJtn9YkBQ/?lang=pt>. Acesso em: 4 dez. 2023.

EPRI, NRC. **Proceedings of the High Energy Arcing Fault (HEAF) Workshop. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), Washington, DC, and the Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA: 2023. RIL 2023-11 and EPRI 3002028342**. . [S.l: s.n.], 17 maio 2023. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML2329/ML23296A096.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2024.

FERREIRA, M. **Qual o papel da energia nuclear na transição do setor no Brasil**. 31 set. 2023. Disponível em: <https://www.nexojournal.com.br/externo/2023/08/31/qual-o-papel-da-energia-nuclear-na-transicao-do-setor-no-brasil>. Acesso em: 30 maio 2024.

FRANCISCO, E. **RAE - eletrônica: exploração do acervo à luz da bibliometria, geoanálise e redes sociais (em português)**. *Revista de Administração de Empresas*, v. **51**, n. **3**. . [S.l: s.n.], jun. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rae/a/STWrjwqRdFMmdKTMncYLjbj/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 14 dez. 2023.

FREITAS, V. **Parsifal**. 2014. Disponível em: <https://parsif.al/>. Acesso em: 14 abr. 2024.

HAMBURGER, K. **NUREG-2218, An International Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT) Expert Elicitation Exercise for High Energy Arcing Faults (HEAFs)**. . [S.l: s.n.], jan. 2018. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr2218/index.html>. Acesso em: 13 out. 2023.

HUGHES, J. **Characterization of Testing and Event Experience for High-Energy Arcing Fault Events**. . [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.epri.com/research/products/000000003002011922>. Acesso em: 14 out. 2023.

IAEA. **Fire Protection in Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1944**. . Vienna, [s.n.], 2021a. Disponível em: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1944web.pdf>. Acesso em: 13 maio 2024.

IAEA. **IAEA SAFETY STANDARDS Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. SSG-3 (Rev. 1)**. . [S.l: s.n.], 2024. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15318-PUB2056_web.pdf. Acesso em: 14 maio 2024.

IAEA. **IAEA Safety Standards. Protection against Internal Hazards in the Design of Nuclear Power Plants. No. SSG-64. SPECIFIC SAFETY GUIDE**. . Vienna, [s.n.], 2021b. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1947_web.pdf. Acesso em: 14 maio 2024.

IAEA. **IRS Guidelines 2022 Edition Joint IAEA and OECD/NEA International Reporting System for Operating Experience (IRS) IAEA Services Series 19 (Rev. 1)**. . Vienna, [s.n.], abr. 2022. Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SVS-19%20\(Rev.1\)web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SVS-19%20(Rev.1)web.pdf). Acesso em: 14 maio 2024.

IBICT. **Tutorial para gerenciamento de referências bibliográficas utilizando o software Zotero**. . [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://antigo.ibict.br/sala-de-imprensa/noticias/item/2168-como-usar-o-zotero-por-andre-appel>. Acesso em: 14 jun. 2024.

IEEE. **IEEE 1584: Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations**. . [S.l.], IEEE, 2018. Disponível em: <https://standards.ieee.org/ieee/1584/5802/>. Acesso em: 19 out. 2023.

IEEE. **IEEE std 308, IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations.** . [S.l: s.n.], 2020. Disponível em: <https://standards.ieee.org/ieee/308/7301/>. Acesso em: 14 nov. 2023.

KABASHIMA, H., KASAHARA, F. "Experimental Study of High Energy Arcing Faults Using Medium Voltage Metalclad Switchgears", **Nuclear Technology**, v. 205, n. 5, p. 694–707, 4 maio 2019. DOI: 10.1080/00295450.2018.1518556. Disponível em: <https://colab.ws/articles/10.1080%2F00295450.2018.1518556>. Acesso em: 14 jun. 2023.

KABASHIMA, H., KASAHARA, F. "EXPERIMENTAL STUDY ON HIGH ENERGYARCING FAULTS (HEAF) TO ASSIST FIRE SAFETY REGULATION. In:SMIRT 24 15th International Seminar on FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS, Proceedings, Bruges, Belgium.". 4 out. 2017. **Anais** [...] Bruges, [s.n.], 4 out. 2017. p. 118–135. Disponível em: https://www.grs.de/sites/default/files/publications/grs-a-3912_0.pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

KTA. **The Nuclear Safety Standards Commission.** nov. 2015. Disponível em: https://www.kta-gs.de/welcome_engl.htm. Acesso em: 15 ago. 2024.

KURIENE, L., RÖWEKAMP, M. "Medium Voltage Breakers from Nuclear Power Plants to be Tested Within the OECD Nuclear Energy Agency Experimental Project HEAF 2. In:SMIRT 25 16th International Seminar on FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS, 2019, Ottawa, Ontario, Canada.". 27 out. 2019. **Anais** [...] Ottawa, [s.n.], 27 out. 2019. p. 137–148. Disponível em: https://www.grs.de/sites/default/files/publications/smirt25_post-conference_fire_seminar_2019-proceedings.pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

LANG, M., NEAL, T. **Arc Flash Basics: Testing Update.** . [S.l: s.n.], 2007. Disponível em: https://ep-de.mersen.com/sites/mercen_de/files/2018-11/WP-Arc-Flash-Basics-Testing-Update-White-Paper.pdf. Acesso em: 14 mar. 2023.

LEE, R. H. "The other Electrical Hazard Electric Arc", **IEEE**, 1981. Disponível em: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/The_other_electrical_hazard.pdf. Acesso em: 14 jan. 2023.

MARINHA DO BRASIL. **LABGENE.** 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/ctmsp/labgene>. Acesso em: 4 jul. 2024.

MARINHA DO BRASIL. **PROSUB**. 2023. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/programas-estrategicos/prosub#main-content>. Acesso em: 4 jul. 2024.

MELLY, N., HAMBURGER, K. A., SALLEY, M. H. "OECD/NEA High Energy Arcing Faults (HEAF) Research – Second Phase of Testing. In: SMIRT 25 16th International Seminar on FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS, 2019, Ottawa, Ontario, Canada.". 27 out. 2019. **Anais** [...] Ottawa, [s.n.], 27 out. 2019. p. 125–136. Disponível em: https://www.grs.de/sites/default/files/publications/smirt25_post-conference_fire_seminar_2019-proceedings.pdf. Acesso em: 14 jan. 2024.

MELLY, N., TAYLOR, G., SALLEY, M. H. "U.S. NRC Pre-Generic Issue (GI) 0-18 High Energy Arcing Faults (HEAF) Involving Aluminum. In: SMiRT 25 16th International Seminar on FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS, 25., 2020, Charlotte, NC. Anais... Charlotte: SMiRT, 2019. p. 123-134.". 27 out. 2019. **Anais** [...] Ottawa, GSR, 27 out. 2019. p. 123–134. Disponível em: https://www.grs.de/sites/default/files/publications/smirt25_post-conference_fire_seminar_2019-proceedings.pdf. Acesso em: 14 jan. 2024.

NEA. **High Energy Arcing Fault Events (HEAF) Project**. 2023. Disponível em: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_24977/high-energy-arcing-fault-events-heaf-project. Acesso em: 20 jun. 2024.

NEA. **NEA (2009), FIRE Project Report: “Collection and Analysis of Fire Events (2002-2008) – First Applications and Expected Further Developments”, OECD Publishing, Paris**. . [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_18766/fire-project-report-collection-and-analysis-of-fire-events-2002-2008-first-applications-and-expected-further-developments?details=true. Acesso em: 8 jun. 2024.

NEA. **NEA (2013), OECD FIRE Project – Topical Report No. 1: Analysis of High Energy Arcing Faults (HEAF) Fire Events, OECD Publishing, Paris**. . Paris, [s.n.], jun. 2013. Disponível em: <http://www.oecd-nea.org/documents/2013/sin/csni-r2013-6.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2024.

NEA. **NEA (2015), A Review of Current Calculation Methods Used to Predict Damage from High Energy Arcing Fault (HEAF) Events, OECD Publishing, Paris**. . [S.l.: s.n.], 2015a. Disponível em: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19624/a-review-of-current-calculation-methods-used-to-predict-damage-from-high-energy-arcing-fault-heaf-events?details=true. Acesso em: 14 mar. 2023.

NEA. NEA (2015), **Collection and Analysis of Fire Events (2010-2013) – Extensions in the Database and Applications: Fire Project Report**, OECD Publishing, Paris. . [S.l: s.n.], 2015b. Disponível em: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19658/collection-and-analysis-of-fire-events-2010-2013-extensions-in-the-database-and-applications-fire-project-report. Acesso em: 23 jun. 2024.

NEA. NEA (2016), **Event Combinations of Fire and Other Events: The Fire Incidents Records Exchange Project**, OECD Publishing, Paris. . [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19706/event-combinations-of-fire-and-other-events-the-fire-incidents-records-exchange-project. Acesso em: 23 jun. 2024.

NEA. NEA (2017), **Report on the Testing Phase (2014-2016) of the High Energy Arcing Fault Events (HEAF) Project: Experimental Results from the International Energy Arcing Fault Research Programme**, OECD Publishing, Paris. . [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19782/report-on-the-testing-phase-2014-2016-of-the-high-energy-arcing-fault-events-heaf-project-experimental-results-from-the-international-energy-arcing-fault-research-programme?details=true. Acesso em: 14 jan. 2024.

NFPA 70E. NFPA ® 70E - **Standard for Electrical Safety in the Workplace**. . [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: www.nfpa.org. Acesso em: 19 jul. 2023.

NRC. EPRI/NRC-RES **Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities, Volume 2: Detailed Methodology**. Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, and U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), Rockville, MD: 2005, EPRI TR-011989 and NUREG/CR-6850. . [S.l: s.n.], 2005. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6850/v2/index.html>. Acesso em: 19 out. 2023.

NRC. **Fire Probabilistic Risk Assessment Methods Enhancements: Supplement 1 to NUREG/CR-6850 and EPRI 1011989**. EPRI, Palo Alto, CA, and NRC, Washington, D.C.: December 2009. 1019259. . [S.l: s.n.], set. 2009. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6850/s1/cr6850s1.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2023.

NRC. **High Energy Arcing Fault Frequency and Consequence Modeling**. EPRI, Palo Alto, CA, and U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), Washington, D.C.: 2023. EPRI 3002025942/NUREG-2262. . [S.l: s.n.], abr. 2023a. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML2310/ML23108A113.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2023.

NRC. HIGH ENERGY ARCING FAULT (HEAF) RESEARCH Needs and Objectives. . [S.l: s.n.], 2018a. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML1808/ML18081B300.pdf>. Acesso em: 19 out. 2023.

NRC. INFORMATION NOTICE 2023-01: RISK INSIGHTS FROM HIGH ENERGY ARCING FAULT OPERATING EXPERIENCE AND ANALYSES. ML22326A204. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML2232/ML22326A204.pdf>. Acesso em: 14 maio 2024b. , 10 mar. 2023

NRC. Nuclear Power Plant Fire Ignition Frequency and Non-Suppression Probability Estimation Using the Updated Fire Events Database: United States Fire Event Experience Through 2009. EPRI, Palo Alto, CA, and U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), Washington, D.C.: 2014. 3002002936/NUREG-2169. . [S.l: s.n.], 2015. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML1501/ML15016A069.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2024.

NRC. NUREG-1925, Rev. 4, “Research Activities FY 2018-2020.” . [S.l: s.n.], 2018b. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1925/r4/index.html>. Acesso em: 14 maio 2024.

ONAGAWA, TOKYO, JAPAN. IAEA mission to Onagawa nuclear power station to examine the performance of systems, structures and components following the great east Japanese earthquake and tsunami IAEA mission report department of nuclear safety and security department of nuclear energy. . [S.l: s.n.], 2012. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/iaeamissiononagawa.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

RAUGHLEY, W. S., LANIK, G. F. Operating Experience Assessment Energetic Faults in 4.16 kV to 13.8 kV Switchgear and Bus Ducts That Caused Fires in Nuclear Power Plants 1986-2001 Regulatory Effectiveness Assessment and Human Factors Branch Division of Systems Analysis and Regulatory Effectiveness Office of Nuclear Regulatory Research. . [S.l: s.n.], 2002. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML0212/ML021290358.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

RÖWEKAMP, M., BERG, H.-P. "Ongoing Enhancements in The German Nuclear Regulatory Framework With Respect To Fire Safety. In: SMIRT 22 13th International Seminar on FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS, 2013, Columbia, SC, USA." . 18 set. 2013. **Anais [...]** Columbia, [s.n.], 18 set. 2013. p. 43–54. Disponível em: https://www.grs.de/sites/default/files/publications/grs-a-3845_0.pdf. Acesso em: 14 maio 2024.

RÖWEKAMP, M., LEHTO, M., WERNER, A., *et al.* **EXPERIENCES FROM THE OECD FIRE DATABASE AND INTENDED FUTURE EXTENSIONS.** . [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: https://iapsam.org/PSAM13/program/Abstract/SpecialSession/SS1_1.pdf. Acesso em: 14 jan. 2023.

SHIRAI, K., MIYAGI, T., IWATA, M., *et al.* "Proposal of an Evaluation Method for Prevention of High Energy Arcing Fault (HEAF) Induced Fires at Low and High Voltage Electrical Cabinets. In: SMIRT 25 16th International Seminar on FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS, 2019, Ottawa, Ontario, Canada.". 27 out. 2019. **Anais [...]** Ottawa, [s.n.], 27 out. 2019. p. 276–291. Disponível em: https://www.grs.de/sites/default/files/publications/smirt25_post-conference_fire_seminar_2019-proceedings.pdf. Acesso em: 14 maio 2024.

SOUZA, M., RIBEIRO, H. **Sustentabilidade Ambiental: uma Meta-análise da Produção Brasileira em Periódicos de Administração Environmental Sustainability: a Meta-Analysis of Production in Brazilian Management Journals.** . [S.l: s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.anpad.org.br/rac>. Acesso em: 14 jun. 2024.

SPELLMEIER, J. P., RIGO, P. D., ROSA, C. B., *et al.* "Potencial de Crescimento de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída nas Capitais Brasileiras". 4 nov. 2020. **Anais [...]** [S.l.], ENEGEP 2020 - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 4 nov. 2020. DOI: 10.14488/enegep2020_tn_sto_344_1767_40206. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_344_1767_40206.pdf. Acesso em: 14 jun. 2024.

TAYLOR, G, HAMBURGER, K., MELLY, N., *et al.* **NUREG/CP-0311, “Proceedings of the Information Sharing Workshop on High Energy Arcing Faults (HEAF)”.** . [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/conference/cp0311/index.html>. Acesso em: 14 fev. 2024.

TAYLOR, G., HAMBURGER, K., MELLY, N., *et al.* **NUREG/CP-0311, “Proceedings of the Information Sharing Workshop on High Energy Arcing Faults (HEAFS)”.** . [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/conference/cp0311/index.html>. Acesso em: 14 fev. 2024.

TAYLOR, Gabriel. **High Energy Arcing Faults (HEAF) Hazard Modeling.** . [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML1918/ML19183A309.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2024.

TSUCHINO, S., KABASHIMA, H., TURNER, S., *et al.* **NUREG/IA-0470, Nuclear Regulatory Authority Experimental Program to Characterize and Understand High Energy Arcing Fault (HEAF) Phenomena, vol. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.: August 2016.** . [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/agreement/ia0470/v1/index.html>. Acesso em: 15 jun. 2024.

9. ANEXOS

ANEXO I - SCOPUS

Author	Title	Year	Doi
Ndirangu, Julius and Limo, Eliud and Kimemia, Peter	Arc - Flash Calculations Using IEEE Std 1584-2018 and Mitigation Measures - Case Study	2023	10.1109/AFRICON55910.2023.10293537
Koutoula, Sotiria G. and Timoshkin, Igor V. and Judd, Martin D. and MacGregor, Scott J. and Wilson, Mark P. and Given, Martin J. and Wang, Tao and Harrison, Emma I.	A Study of Energy Partition during Arc Initiation	2016	10.1109/TPS.2016.2579312
Presley, Mary R. and Julius, Jeffrey A. and Grobelaar, Jan F. and Kohlhepp, Kaydee D.	A review of seismic operating experience with implications for human reliability	2013	
Yang, Zhi and Xu, Haifeng and Xie, Dong and Yu, Jie and Ni, Qianhang and Chen, Tianheng and He, Qiang	Calculation model of arc discharge pressure in transformer oil	2023	10.1109/SGES59720.2023.10366989
Ble, Frank Zoko and Lehtonen, Matti and Kim, Charles	Novel approach of arcing faults electromagnetic radiated energy source location using antennas in power systems	2014	10.15866/iree.v9i5.4218
Sawada, Naoko and Uemura, Makoto and Beyer, Johanna and Pfister, Hanspeter and Fujishiro, Issei	TimeTubesX: A Query-Driven Visual Exploration of Observable, Photometric, and Polarimetric Behaviors of Blazars	2022	10.1109/TVCG.2020.3025090
Chang, Choong-koo	Mitigation of high energy arcing faults in nuclear power plant medium voltage switchgear	2019	10.1016/j.net.2018.08.014
Yan, Chenguang and Hao, Zhiguo and Zhang, Baohui and Zheng, Tao and Zhang, Shifeng and Chao, Guang and Yang, Xian and Zhou, Dan	Simulation and analysis of power transformer internal arcing faults overpressure characteristics	2014	10.1109/POWERCON.2014.6993827
Röwekamp, Marina and Katzer, Steffen and Klindt, Joachim and Berg, Heinz-Peter	Insights from investigations of high energy arcing fault "heaf" events in german nuclear power plants	2012	10.1115/ICONE20-POWER2012-54158
Berg, Heinz-Peter and Albaizar, Eunat Armañanzas and Fritze, Nicole and Röwekamp, Marina	Consideration of event combinations of fires and other events in fire pra - Insights from the OECD fire database	2017	
Shirai, Koji and Miyagi, Tsukasa and Iwata, Mikimasa and Tasaka, Koji and Ji, Junghoon	Demonstrative heaf (high energy arcing fault) fire tests of high and low voltage switchgears of nuclear power plants	2018	10.1115/ICONE26-82177
Hussain, Ghulam Anjad and Shafiq, Muhammad and Lehtonen, Matti and Hashmi, Murtaza	Online Condition Monitoring of MV Switchgear Using D-Dot Sensor to Predict Arc-Faults	2015	10.1109/JSEN.2015.2474122
Takeshima, Toru and Tanaka, Yasunori and Uesugi, Yoshihiko and Ishijima, Tatsuo	Numerical thermofluid simulation of high current air arcs at fault point contaminated with metal vapor from evaporation of metal electrode in open air	2019	10.1002/tee.23020
Iwata, M. and Miyagi, T. and Goda, Y. and Shirai, K.	Calculation of pressure rise and energy of hot gases due to high energy arcing faults in the metal-clad switchgear	2017	10.14311/ppt.2017.2.116
Muhamad, N.A. and Phung, B.T. and Blackburn, T.R.	Application of common transformers faults diagnosis methods on biodegradable oil-filled transformers	2012	10.1007/s00202-012-0232-z
Lee, W.-J. and Gammon, T. and Zhang, Z. and Johnson, B. and Beyreis, J.	Arc flash and electrical safety	2013	10.1109/CPRE.2013.6822024
Ble, Frank Zoko and Lehtonen, Matti and Sihvola, Ari and Kim, Charles	Leading edge detection of RF-signal for power arcing source location	2014	10.15866/iree.v9i5.3772

Author	Title	Year	Doi
Pan, Zhicheng and Deng, Jun and Xie, Zhicheng and Peng, Xiang and Hou, Mingchun and Zhou, Haibin	Research on Simulation and Verification Experiment Method for Pressure Characteristics of Converter Transformer Tank under Internal Arc Fault	2023	10.1109/CEEPE58418.2023.10166954
Luna, Ray and Cassidy, Brian and Franco, Jesus	Reducing arc flash risk with the application of protective relays	2009	10.1109/PCICON.2009.5297175
Salikhov, S.V. and Toleukhanova, S.K. and Bordyuzhin, I.G. and Savchenko, A.G.	Phase Composition and Magnetic Properties of Fe ₂ O ₃ -FeO-Gd ₂ O ₃ Powders after High-Energy Ball Milling and Thermal Treatment	2019	10.3103/S1062873819100186
Röwekamp, Marina and Berg, Heinz Peter	PSA significance of events with electrically induced high energy (arcing) faults	2008	
Okutan, Merve and Evecan, Dilek and Yıldırım, Saffettin and Özkan Zayim, Esra and Deligöz, Hüseyin	Investigating the effect of electrolyte types with various ionic liquids on the electrochromic performance of PEDOT:PSS based LbL multilayers	2020	10.1016/j.mee.2020.111454
Phung, B.T. and Muhamad, N.A. and Blackburn, T.R.	Partial discharge and dissolved gas analysis of common fault types in bio-degradable oil transformers	2010	
Kabashima, Hajime and Kasahara, Fumio	Experimental Study of High Energy Arcing Faults Using Medium Voltage Metalclad Switchgears	2019	10.1080/00295450.2018.1518556
Ammerman, Ravel F. and Gammon, Tammy and Sen, P.K. and Nelson, John P.	Comparative study of arc modeling and arc flash incident energy exposures	2008	10.1109/PCICON.2008.4664001
Forell, B. and Einarsson, S.	A survey of secondary effects from fires in nuclear power plants	2010	
Bahramirad, Shaghayegh and Tyschenko, Peter and Bellei, Terry	Evaluation of effectiveness and safety of CO ₂ cleaning of energized contaminated pad-mounted gear	2014	
Moustafa, Moustafa Abdelrahman Mohamed Mohamed and Chang, Choong-koo	Preventing cascading failure of electric power protection systems in nuclear power plant	2021	10.1016/j.net.2020.06.010
Susilo, Achmad and Muslim, Joko and Hikita, Masayuki and Kozako, Masahiro and Tsuchie, Motoo and Arief, Yanuar Z. and Muhamad, Nor Asiah and Suzuki, Takashi and Hatada, Satoshi and Kanetani, Akinori and Kano, Takaaki and Suwarno and Khayam, Umar	Comparative study of partial discharge characteristics and dissolved gas analysis on palm-based oil as insulating material	2014	10.1109/ICPERE.2014.7067206

ANEXO II - SCIENCE DIRECT

Author	Title	Year	Doi
Ryo Morita and Kiyoshi Saito and Ayumi Yuyama	Development and analysis of seismic experience database of structures, systems and components in nuclear power plants based on investigation reports and maintenance records	2021	https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111078
Lan Jin and Dowon Kim and Ahmed Abu-Siada	State-of-the-art review on asset management methodologies for oil-immersed power transformers	2023	https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109194
James C Cawley and Gerald T Homce	Occupational electrical injuries in the United States, 1992–1998, and recommendations for safety research	2003	https://doi.org/10.1016/S0022-4375(03)00028-8
Mohd Syukri Ali and Ab Halim {Abu Bakar} and Azimah Omar and Amirul Syafiq {Abdul Jaafar} and Siti Hajar Mohamed	Conventional methods of dissolved gas analysis using oil-immersed power transformer for fault diagnosis: A review	2023	https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109064
Choong-koo Chang	Mitigation of high energy arcing faults in nuclear power plant medium voltage switchgear	2019	https://doi.org/10.1016/j.net.2018.08.014
Dominik Hermann	Identification of Fire Modeling Issues Based on an Analysis of Real Events from the OECD FIRE Database	2017	https://doi.org/10.1016/j.net.2017.01.010
Hossam Shalabi and George Hadjisophocleous	Decision tree for FSSA rooms in CANDU	2020	https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110568
Serkan Gunal and Omer Nezih Gerek and Dogan Gokhan Ece and Rifat Edizkan	The search for optimal feature set in power quality event classification	2009	https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.01.051

ANEXO III - WEB OF SCIENCE

Author	Title	Year	Doi
Yan, Chenguang and Hao, Zhiguo and Zhang, Baohui and Zheng, Tao and Zhang, Shifeng and Chao, Guang and Yang, Xian and Zhou, Dan	Simulation and Analysis of Power Transformer Internal Arcing Faults Overpressure Characteristics	2014	
Yang, Xian and Guan, Jun and Lin, Chunyao and Zhou, Dan and Ke, Chunjun and Chen, Whenzhe and Hao, Zhiguo	Dynamic Pressure Analysis and Protection of Transformer in Internal Arcing Fault by FEM	2015	
Kabashima, Hajime and Kasahara, Fumio	Experimental Study of High Energy Arcing Faults Using Medium Voltage Metalclad Switchgears	2019	10.1080/00295450.2018.151855
Roewekamp, Marina and Katzer, Steffen and Klindt, Joachim and Berg, Heinz-Peter	INSIGHTS FROM INVESTIGATIONS OF HIGH ENERGY ARCING FAULT "HEAF" EVENTS IN GERMAN NUCLEAR POWER	2012	
Babrauskas, Vytenis	Electric arc explosions-A review	2017	10.1016/j.firesaf.2017.02.006
Liu, Yu-Jen and Chen, I, Cheng- and Fu, Wei-Chung and Lee, Yih-Der and Cheng, Chin-Chan and Chen, Yen-Fu	A Hybrid Approach for Low-Voltage AC Series Arc Fault Detection	2023	10.3390/en16031256
Khalil, Essam E. and ElBialy, Esmail and Ibrahim, Mohamed and Fares, Mohamed A.	NUMERICAL INVESTIGATION OF SMOKE CONTROL IN SWITCHGEAR ROOM	2018	
Shalabi, Hossam and Hadjisophocleous, George	CANDU FIRE LOAD DENSITIES IN CANADIAN NUCLEAR	2019	10.12943/CNR.2019.00004
Chang, Choong-koo	Mitigation of high energy arcing faults in nuclear power plant medium voltage switchgear	2019	10.1016/j.net.2018.08.014
Land, HB and Eddins, CL and Klimek, JM	Evolution of Arc Fault protection technology at APL	2004	
Shirai, Koji and Miyagi, Tsukasa and Iwata, Mikimasa and Tasaka, Koji and Ji, Junghoon	DEMONSTRATIVE HEAF (HIGH ENERGY ARCING FAULT) FIRE TESTS OF HIGH AND LOW VOLTAGE SWITCHGEARS OF NUCLEAR POWER PLANTS	2018	
Brodeur, Samuel and Dastous, Jean-Bernard	Design and Testing of an Arc Resistant Power Transformer Tank	2020	10.1109/TPWRD.2019.2922505

ANEXO IV - GOOGLE

Author	Title	Year	Doi
Berg, Heinz-Peter and Rowekamp, Marina	Combinations of fires with other types of hazards in nuclear and process industry installations	2021	10.26408/srsp-2021-02
Brown, JW and Nowlen, SP and Wyant, FJ	High energy arcing fault fires in switchgear equipment, a literature review	2009	DOI: 10.2172/972462
Hyslop, JS and Brown, Jason W and Nowlen, Steven P	Considerations for improving fire PRA treatment of high energy arcing faults	2008	
Beilmann, Markus and Bounagui, Abderrazzaq and Cayla, Jean Pierre and Fourneau, Charles and Haggstrom, Anna and Hermann, Dominik and Garcia, Miguel-Angel Jimenez and Kabashima, Hajime and Kuriene, Laima and Lee, Sangkyu and others	Fire safety at nuclear sites: Challenges for the future--an international perspective	2019	
Berg, Heinz Peter and Rowekamp, Marina	Investigation of High Energy Arcing Fault Events in Nuclear Power Plants	2011	DOI: 10.5772/20497
OECD	A Review of Current Calculation Methods Used to Predict Damage from High Energy Arcing Fault(HEAF) Events	2013	
OECD	OECD FIRE Project - Topical Report No. 1, Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF) Fire Events	2013	
Susumu, Tsuchino and Akihiro, Matsuda and Stephen, Turner	Structural Effect Caused By High Energy Arcing Faults At Nuclear Power Plants	2019	
Berg, Heinz-Peter and Rowekamp, M and Fritze, Nicole and others	Consideration of event combinations of fires and other events in Fire PRA- Insights from the OECD FIRE Database	2016	
NRC	EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities: Volume 2: Detailed Methodology, Final Report (EPRI 1011989, NUREG/CR-6850)	2005	
NRC	Fire Probabilistic Risk Assessment Methods Enhancements, Supplement 1 to NUREG/CR-6850 and EPRI 1011989. EPRI 1019259, NUREG/CR6850 Supplement 1.	2010	
NRC	High Energy Arcing Faults in Electrical Equipment Phase 2 Draft Test Plan	2018	
OECD	Event Combinations of Fire and Other Events: The Fire Incidents Records Exchange Project, The Fire Incidents Records Exchange Project - Topical Report No. 3	2016	

ANEXO V – RESEARCH RABBIT

Author	Title	Year	Doi
Koji Shirai and Tsukasa Miyagi and Mikimasa Iwata and Koji Tasaka and Junghoon Ji	Demonstrative HEAF (High Energy Arcing Fault) Fire Tests of High and Low Voltage Switchgears of Nuclear Power Plants	2018	10.1115/icones26-82177
Toru Takeshima and Toru Takeshima and Yasunori Tanaka and Yasunori Tanaka and Yoshihiko Uesugi and Yoshihiko Uesugi and Tatsuo Ishijima and Tatsuo Ishijima	Numerical thermofluid simulation of high current air arcs at fault point contaminated with metal vapor from evaporation of metal electrode in open air	2019	10.1002/tee.23020
H. P. Berg and M. Röwekamp	Investigation of High Energy Arcing Fault Events in Nuclear Power Plants	2011	10.5772/20497
M. Röwekamp and Steffen Katzer and Joachim Klindt and H. P. Berg	Insights From Investigations of High Energy Arcing Fault “HEAF” Events in German Nuclear Power Plants	2012	10.1115/icones20-power2012-54158
Steven P. Nowlen and Jason Brown and Francis J. Wyant	High energy arcing fault fires in switchgear equipment : a literature review.	2008	10.2172/972462
A. Putorti and Nicholas B. Melly and S. Bareham and Joseph Praydis	FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS“ CHARACTERIZING THE THERMAL EFFECTS OF HIGH ENERGY ARC FAULTS	2015	
PARK, JongSeuk , KIM, MeKyoung, LEE, SangKyu	Current Status and Experimental Study of High Energy Arcing Fault in NPPs	2017	
PARK, JongSeuk , KIM, MeKyoung, LEE, SangKyu	Enhanced Understanding of High Energy Arcing Fault Phenomena in NPPs	2016	
Anthony D. Putorti and Nicholas Melly and Scott D. Bareham and Joseph E. Praydis	Characterizing the thermal effects of High Energy Arc Faults NIST	2015	
OECD	A Review of Current Calculation Methods Used to Predict Damage from High Energy Arcing Fault (HEAF) Events	2015	
Hajime Kabashima and Fumio Kasahara	Experimental Study of High Energy Arcing Faults Using Medium Voltage Metalclad Switchgears	2019	10.1080/00295450.2018.1518556
Choong-Koo Chang	MITIGATION OF HIGH ENERGY ARCING FAULTS IN NUCLEAR POWER PLANT MEDIUM VOLTAGE SWITCHGEAR	2019	10.1016/j.net.2018.08.014
H. Berg and Eunata Armañanzas Albaizar and N. Fritze and M. Röwekamp	CONSIDERATION OF EVENT COMBINATIONS OF FIRES AND OTHER EVENTS IN FIRE PRA-INSIGHTS FROM THE OECD FIRE DATABASE	2016	

ANEXO VI – UNIFICADO

Author	Title	Year	Source	Doi	Status
Berg, Heinz-Peter and Rowekamp, Marina	Combinations of fires with other types of hazards in nuclear and process industry installations	2021	Google	10.26408/srsp-2021-02	Accepted
Koji Shirai and Tsukasa Miyagi and Mikimasa Iwata and Koji Tasaka and	Demonstrative HEAF (High Energy Arcing Fault) Fire Tests of High and Low Voltage Switchgears of Nuclear	2018	Research Rabbit	10.1115/icone26-82177	Accepted
Brown, JW and Nowlen, SP and Wyant, FJ	High energy arcing fault fires in switchgear equipment, a literature review	2009	Google	10.2172/972462	Accepted
Hyslop, JS and Brown, Jason W and Nowlen, Steven P	Considerations for improving fire PRA treatment of high energy arcing faults	2008	Google		Accepted
Ndirangu, Julius and Limo, Eliud and Kimemia, Peter	Arc - Flash Calculations Using IEEE Std 1584-2018 and Mitigation Measures - Case Study	2023	Scopus	10.1109/AFRICON55910.2023.1029	Accepted
Koutoula, Sotiria G. and Timoshkin, Igor V. and Judd, Martin D. and MacGregor, Scott J. and Wilson, Mark P. and Given, Martin J. and Wang, Tao and Harrison, Emma I.	A Study of Energy Partition during Arc Initiation	2016	Scopus	10.1109/TPS.2016.2579312	Accepted
M. Rówekamp and Steffen Katzer and Joachim Klindt and H. P. Berg	Insights From Investigations of High Energy Arcing Fault "HEAF" Events in German Nuclear Power Plants	2012	Research Rabbit	10.1115/icone20-power2012-54158	Accepted
Anthony D. Putorti and Nicholas Melly and Scott D. Bareham and Joseph E. Praydis	Characterizing the thermal effects of High Energy Arc Faults NIST	2015	Research Rabbit		Accepted
Ryo Morita and Kiyoshi Saito and Ayumi Yuyama	Development and analysis of seismic experience database of structures, systems and components in nuclear power plants based on investigation reports and maintenance	2021	Science@Direct	10.1016/j.nucengdes.2021.111078	Accepted
Kabashima, Hajime and Kasahara, Fumio	Experimental Study of High Energy Arcing Faults Using Medium Voltage Metalclad Switchgears	2019	ISI Web of Science	10.1080/00295450.2018.1518556	Accepted
Berg, Heinz Peter and Rowekamp, Marina	Investigation of High Energy Arcing Fault Events in Nuclear Power Plants	2011	Google	10.5772/20497	Accepted
OECD	A Review of Current Calculation Methods Used to Predict Damage from High Energy Arcing Fault(HEAF) Events	2013	Google		Accepted
OECD	OECD FIRE Project - Topical Report No. 1, Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF) Fire Events	2013	Google		Accepted
Susumu, Tsuchino and Akihiro, Matsuda and Stephen, Turner	Structural Effect Caused By High Energy Arcing Faults At Nuclear Power Plants	2019	Google		Accepted
NRC	EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities: Volume 2: Detailed Methodology, Final Report (EPRI 1011989, NUREG/CR-6850)	2005	Google		Accepted
NRC	Fire Probabilistic Risk Assessment Methods Enhancements, Supplement 1 to NUREG/CR-6850 and EPRI 1011989. EPRI 1019259, NUREG/CR6850	2010	Google		Accepted
Babrauskas, Vytenis	Electric arc explosions-A review	2017	ISI Web of Science	10.1016/j.firesaf.2017.02.006	Accepted

Author	Title	Year	Source	Doi	Status
Shalabi, Hossam and Hadjisophocleous, George	CANDU FIRE LOAD DENSITIES IN CANADIAN NUCLEAR PLANTS	2019	ISI Web of Science	10.12943/CNR.2019.00004	Accepted
Chang, Choong-koo	Mitigation of high energy arcing faults in nuclear power plant mediumvoltage switchgear	2019	ISI Web of Science	10.1016/j.net.2018.08.014	Accepted
Takeshima, Toru and Tanaka, Yasunori and Uesugi, Yoshihiko and Ishijima, Tatsuo	Numerical thermo-fluid simulation of high current air arcs at fault point contaminated with metal vapor from evaporation of metal electrode in open air	2019	Scopus	10.1002/tee.23020	Accepted
Iwata, M. and Miyagi, T. and Goda, Y. and Shirai, K.	Calculation of pressure rise and energy of hot gases due to high energy arcing faults in the metal-clad switchgear	2017	Scopus	10.14311/ppt.2017.2.116	Accepted
Lee, W.-J. and Gammon, T. and Zhang, Z. and Johnson, B. and Beyreis, J.	Arc flash and electrical safety	2013	Scopus	10.1109/CPRE.2013.6822024	Accepted
Land, HB and Eddins, CL and Klimek, JM	Evolution of Arc Fault protection technology at APL	2004	ISI Web of Science		Accepted
Hossam Shalabi and George Hadjisophocleous	Decision tree for FSSA rooms in CANDU	2020	Science@Direct	10.1016/j.nucengdes.2020.110568	Accepted
NRC	High Energy Arcing Faults in Electrical Equipment Phase 2 Draft Test Plan	2018	Google		Accepted
OECD	Event Combinations of Fire and Other Events: The Fire Incidents Records Exchange Project, The Fire Incidents Records Exchange Project - Topical Report No. 3	2016	Google		Accepted