

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**UM ESTUDO EXPLORATÓRIO DE CAUSAS E
CONSEQUÊNCIAS DE INCÊNDIOS EM
TRANSFORMADORES DE SUBESTAÇÕES**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

DANIEL AMARANTE TORRES BANDEIRA

Orientador: Prof. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte, Ph.D.

RECIFE, SETEMBRO /2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

B214u **Bandeira, Daniel Amarante Torres**

Um estudo exploratório de causas e conseqüências de incêndios em transformadores de subestação / Daniel Amarante Torres Bandeira. – Recife: O Autor, 2007.
x, 78 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2007.

Inclui referências bibliográficas e Apêndice.

1. Engenharia de Produção. 2. Falhas em transformadores de potência. 3. Incêndios em transformadores de potência. 4. Identificação de riscos de incêndio. 5. Impactos devido a incêndios em transformadores de potência. I. Título.

658.5 CDD (22.ed.)

UFPE/BCTG/2007-145



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

DANIEL AMARANTE TORRES BANDEIRA

“Um Estudo Exploratório das Causas e Conseqüências de Incêndios em
Transformadores de Subestações”

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato **DANIEL AMARANTE TORRES BANDEIRA APROVADO.**

Recife, 16 de agosto de 2007.



Prof. DAYSE CAVALCANTI DE LEMOS DUARTE, PhD (UFPE)



Prof. ENRIQUE ANDRÉS LÓPEZ DROGUETT, PhD (UFPE)



Prof. RUBENS EUGÊNIO BARRETO RAMOS, Doutor (UFRJ)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus, por tudo.

Agradeço ao meu pai Fernando, a minha mãe Elma, e as minhas irmãs Marcela e Fernanda, que sempre me apoiaram em quaisquer circunstâncias.

A minha namorada Janaína, pelo apoio e compreensão em diversas ocasiões que precisei me ausentar.

Agradeço também a Professora Dayse Duarte, não só pela transmissão do conhecimento, mas também pela dedicação, empenho e paciência como orientadora.

A todos os colegas do RiscTec, sobretudo Felipe Andrade, Thiago Ancelmo, Cássia Mello e Eduardo Moura.

Gostaria de agradecer a colaboração do Medina(CHESF) e Messias no presente trabalho.

Ao amigo Marconi pela ajuda e incentivo constante.

Ao CNPq, Capes/Facepe pelo apoio financeiro durante todo esse período.

RESUMO

O Brasil pode ser considerado único em âmbito mundial, em se tratando da sua produção, transmissão e distribuição de energia elétrica. Sua malha energética, é bastante complexa e extensa, apresentando uma demanda que cresce a cada ano.

Nos últimos dez anos houve um crescimento no número de incêndios em transformadores de potência, ocasionou na maioria dos casos a interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Este fato gera transtornos não só aos consumidores de energia, sejam eles do segmento industrial, de comércio e serviços, e para sociedade em geral, mas para a própria organização que será responsável por reposição de equipamentos, disputa jurídica com seguradoras, havendo ainda a possibilidade de ter causado algum impacto ao meio ambiente e à população.

Desta forma, é necessário a realização de uma análise de gerenciamento dos riscos de incêndio em transformadores de potência. Uma análise qualitativa e quantitativa deve ser realizada, na identificação dos riscos inerentes ao processo de transformação de energia realizado pelos transformadores.

Deve-se identificar não só o que pode dar errado, mas como pode dar errado. Realizando assim uma identificação dos possíveis cenários de incêndio em transformadores de potência. Além da identificação dos cenários, é necessário um bom projeto de lay-out, incorporando as tecnologias e normas existentes de proteção contra incêndios.

O uso de modelos matemáticos para a quantificação da energia liberada no caso de um incêndio ou explosão, também é uma valiosa ferramenta para que seja avaliado o impacto em relação às pessoas, estruturas e ao meio ambiente, de um possível incêndio e de que maneira pode-se agir para minimizar tais impactos.

Palavras Chaves: Falhas em transformadores de potência, Incêndios em transformadores de potência,, Identificação de riscos de incêndio, Impactos devido a incêndios em transformadores de potência..

ABSTRACT

Brazil can be considered unique in world-wide scope, considering its production, transmission and distribution of electric energy. Its energy mesh, is sufficiently complex and extensive, presenting a demand that grows each year.

In the last ten years a growth in the number of transformer fire had caused in most of cases the interruption of the supply of electric energy.

This fact not only generates upheavals to the energy consumers, even if they are of the industrial segment, commerce and services, and for society in general. But, for the proper organization that will be responsible for equipment replacement, legal dispute with insuring, and also the possibility to have caused some impact to the environment and the population.

Therefore, it's necessary the accomplishment of an analysis of management of the fire risks in power transformers. A qualitative and quantitative analysis must be carried through, in the identification of risks that are inherent to the process of energy transformation in a substation.

It must not only be identified what it can go wrong, but how can go wrong. Making an identification of the possible fire scenarios in power transformers. Beyond the identification of the scenarios, a well done project of the layout is also necessary, incorporating technologies and existing norms of protection against fires.

The use of mathematical models for the quantification of the energy in the case of a fire or an explosion, is also a valuable tool to evaluate the impact to the people, structures and to the environment, of a possible fire, and how to minimize such impacts.

Keywords: Power Transformer Failures, Power transformers fire, Identification of fire risks, Impacts due the power transformer fires .

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	II
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	IV
SUMÁRIO.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	X
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	5
1.1.1 <i>Objetivos</i>	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 Conceitos Básicos de Análise de Risco.....	7
2.2 Técnicas de Identificação de Perigos.....	10
2.2.1 <i>Métodos Comparativos</i>	11
2.2.2 <i>Métodos Fundamentais</i>	12
2.2.3 <i>Métodos dos Diagramas Lógicos das Falhas</i>	13
2.3 Transformadores de Potência: Conceito.....	14
2.4 Proteção contra Incêndios para Transformadores.....	16
2.4.1 <i>Paredes Corta-Fogo</i>	16
2.4.2 <i>Distâncias Mínimas de Separação</i>	18
2.4.2 <i>Diques de Contenção</i>	19
2.4.4 <i>Sistema de Spray Utilizando Água e Espuma</i>	20
2.5 Buchas de Alta Tensão.....	21
2.6 Disjuntores.....	21
3 CAUSAS DE INCÊNDIO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....	23
3.1 Análise Histórica.....	23
3.2 Falhas em Transformadores de Potência.....	25
3.3 Cenários de Incêndio em Transformadores.....	29
3.4 A Experiência Brasileira.....	36
3.5 Metodologia para Identificação de Cenários de Incêndios em Transformadores com Um Novo Diagrama Lógico.....	40
4 MODELO DE INCÊNDIO DE POÇA EM TRANSFORMADORES.....	50
4.1 Descrição do Modelo.....	50
4.2 Resultados do Modelo.....	54
5 CONSEQUÊNCIAS DE UM INCÊNDIO EM UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	59
5.1 Introdução.....	59
5.2 Impactos Indiretos.....	59
5.2.1 <i>Impacto ao Meio Ambiente</i>	59

5.2.2 <i>Imagem da Organização</i>	59
5.3 Impactos Devido a Indisponibilidade.....	60
5.4 Impactos Diretos.....	60
5.4.1 <i>Impacto aos Seres Humanos</i>	60
5.4.2 <i>Impacto em Equipamentos e Estruturas</i>	62
6 CONCLUSÕES	63
6.1 Resumo das Atividades.....	63
6.2 Desafios para Trabalhos Futuros.....	64
APÊNDICE 1	65
APÊNDICE 2	69
APÊNDICE 3	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa do sistema elétrico brasileiro (fonte:ONS).....	2
Figura 2.1 - Ilustração da diferença entre falha	9
Figura 2.2 - Transformador de potência em uma subestação de energia.....	15
Figura 2.3 - Altura da parede corta-fogo segundo NFPA 850.....	17
Figura 2.4 - Largura da parede corta-fogo segundo JEAG 5002.....	18
Figura 2.5 - Incêndio em transformador de potência.....	19
Figura 2.6 - Buchas de alta tensão	21
Figura 2.7 – Disjuntor de alta tensão.....	22
Figura 3.1 - Percentual da taxa de falha de transformadores por componente (GCOI-1996).....	26
Figura 3.2 - Percentual da taxa de falha de transformadores por componente (CHESF).....	27
Figura 3.3 - Árvore das falhas para incêndio em transformadores.....	30
Figura 3.4 - Árvore das falhas para incêndio em transformadores (aquecimento interno).....	31
Figura 3.5 - Ilustração do cenário em que houve a degradação do fluido presente no reservatório do transformador.....	32
Figura 3.6 - Distribuição típica de falhas.....	35
Figura 3.7 - Ruptura do tanque.....	36
Figura 3.8 - O Sistema elétrico brasileiro. Fonte: NOS (Operador Nacional do Sistema).....	37
Figura 3.9 - Vazamento do óleo mineral pelo tanque do transformador.....	38
Figura 3.10 - Evolução de um incêndio em um transformador.....	39
Figura 3.11 - Detalhe do lay-out de uma usina.....	40
Figura 3.12 –Causas de falhas em buchas.....	44
Figura 3.13 –Diagrama Contínuo.....	45
Figura 3.14 - Diagrama contínuo de um cenário de incêndio levando em consideração o limite da suportabilidade do tanque.....	47
Figura 3.15 - Diagrama Contínuo de um possível cenário de incêndio numa bay de transformadores.....	48
Figura 3.16 - Diagrama contínuo de um cenário de incêndio, mencionado na seção 3.3.....	49
Figura 4.1 – Esquema de transferencia de calor.....	51
Figura 4.2 – Parâmetros geométricos de um incêndio de poça.....	53
Figura 4.3 - Calor liberado em kW em função do diâmetro da poça(m).....	55
Figura 4.4 - Curvas da energia incidente no alvo em função da distância do mesmo à chama.....	56
Figura 4.5 – Inclinação da chama devido a velocidade dos ventos.....	57
Figura 4.6 – Relação da altura da chama com o diâmetro de poça e a velocidade dos ventos.....	58
Figura 5.1 - Intensidade da radiação térmica em função do tempo.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Dados do sistema elétrico brasileiro(fonte:ONS).....	3
Tabela 1.2 – Capacidade de transformação, comparação entre os ano de 2006 e a previsão para 2015(fonte:ONS).....	3
Tabela 2.1 – Métodos de identificação de perigos.....	11
Tabela 2.2 – Distâncias mínimas de separação entre transformadores e outras estruturas adjacentes.....	19
Tabela 3.1 – Breve análise histórica de incêndios em transformadores de potência.....	24
Tabela 3.2 – Produtos gerados na decomposição do dielétrico, do material e de agentes contaminantes do dielétrico devido de falhas elétricas.....	33
Tabela 5.1 - Intensidade da radiação térmica em função do tempo.....	61
Tabela 5.2 - Limites da dor provenientes da intensidade da radiação térmica.....	61

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANSI – *American National Standards Institute* (Instituto Nacional Americano de Padrões)

BLEVE – *Boiling Liquid Expand Vapor Explosion* (Explosão do Líquido Aquecido Expandido a Vapor)

BS – *Brithish Standard* (Padrão Britânico)

CDC – Comutador de Derivações em Carga

CDE – Comissão de Desempenho de Equipamentos e Instalações

CDST – Comutador de Derivações sem Tensão

CEB – Companhia Energética de Brasília

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.

CELG – Companhia Energética de Goiás

CEMAT – Centrais Elétricas Matogrossenses S.A.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CERJ – Companhia de Eletricidade do Estado do Rio de Janeiro

CESP – Companhia Energética de São Paulo

CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

COPEL – Companhia de Energia Elétrica do Paraná

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

ELETRONORTE – Centrais Elétrica do Norte do Brasil S.A.

ELETROPAULO – Eletricidade de São Paulo S.A.

ELETROSUL - Eletrosul Centrais Elétricas S.A.

ENERSUL – Empresa Energética do Mato Grosso do Sul

ESCELSA – Espírito Santo Centrais Elétricas S.A.

FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis* (Análise do Tipo e Efeito de Falha)

FURNAS – Furnas Centrais Elétricas S.A.

GCOI – Grupo Coordenador para Operação Interligada

HAZOP - *Hazard and Operability Study* (Estudo de Riscos e Operações)

HCL – Ácido Clorídrico

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto dos Engenheiros Elétrico Eletrônicos)

ITAIPU – Usina Hidrelétrica de Itaipu

JEAG – *Japanese Electrical Association* (Associação Elétrica Japonesa)
LIGHT – Serviços de Eletricidade S.A.
NBR – Norma Brasileira de Regulamentação
NEC – *National Electric Code* (Código Elétrico Nacional)
NEMA – *National Electrical Manufacturers Association* (Associação Nacional dos Produtores Elétricos)
NFPA – *National Fire Protection Association* (Associação Nacional de Proteção contra Incêndios)
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIB – Produto Interno Bruto
PVC – Cloreto de Polivinila
SE – Subestação
SEP – Sistemas Eletronicamente Programáveis
SIN – Sistema Interligado Nacional.
TNT – Trinitrotolueno
XLPE – Polietileno Reticulado

1 INTRODUÇÃO

Por que os incêndios e explosões acontecem em transformadores de potência, apesar de já existir uma ampla experiência em projeto, construção e operação? Apesar da maturidade da tecnologia e do gerenciamento dos riscos, incêndios, considerados eventos raros, acontecem causando perdas substanciais. Enquanto os engenheiros que projetam os transformadores reconhecem e entendem os perigos de incêndios, através das interações do sistema e buscam preveni-los, é o operador do sistema o responsável por operá-lo de forma segura no seu dia-a-dia. Logo, é imprescindível que este esteja consciente sobre o que pode dar errado e talvez mais importante como possa dar errado.

Nos últimos dez anos o setor elétrico brasileiro tem assistido a um aumento do número de incêndios envolvendo transformadores de potência, em outras palavras, nos últimos dez anos a falta do fornecimento de energia devido a incêndios nesse tipo de equipamento, entraram na lista das grandes ameaças para a sociedade, razão pela qual é urgente e imprescindível entender as causas e conseqüências dos incêndios em transformadores.

Porque é necessário investir tempo e recursos para desenvolver uma nova maneira de pensar acerca dos riscos de incêndios?

Primeiro, devido a própria complexidade do sistema a ser estudado. Para se ter uma idéia da dimensão e da complexidade do sistema elétrico brasileiro, segundo a ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) que controla o SIN (Sistema Interligado Nacional), a malha energética brasileira possui tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica.

Para uma melhor compreensão, a Figura 1.1 ilustra o sistema elétrico brasileiro, a Tabela 1.1 mostra alguns dados relativos ao sistema tais como: a capacidade instalada, a demanda, produção, número e extensão das linhas de transmissão, número de subestações e a capacidade de transformação no ano de 2006. A Tabela 1.2 compara a capacidade de transformação do ano de 2006 com a previsão para a 2015, percebe-se que esta capacidade(e conseqüentemente o número de unidades de transformadores) aumentará em

aproximadamente 50%, tornando ainda maior a complexidade do sistema em questão, e a relevância de um estudo que trate do gerenciamento de riscos de incêndio no setor elétrico e mais especificamente em transformadores de potência.

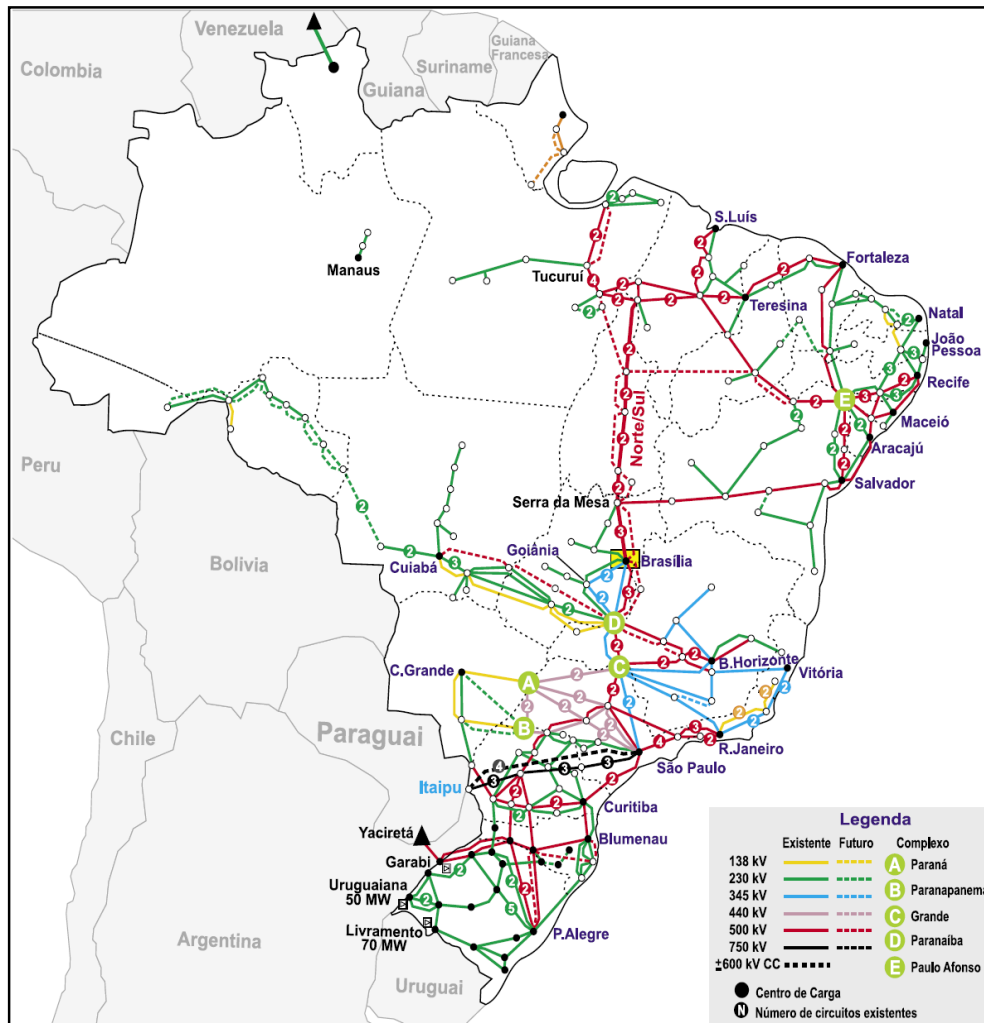


Figura 1.1 – Mapa do sistema elétrico brasileiro (fonte:ONS).

Tabela 1.1 – Dados do sistema elétrico brasileiro(fonte:ONS).

2006	
Capacidade Instalada (MW)	94.757
Hidroelétricas	81.299
Termoelétricas	12.695
Nuclear	2.007
Outras	763
Demanda (MW)	60.389
Produção (TWh)	416
Linhas de Transmissão ≥ 230 kV (km)	74.793
Linhas de Transmissão ≥ 230 kV (circuitos)	905
Subestações	353
Capacidade de Transformação (GVA)	171

Tabela 1.2 – Capacidade de transformação, comparação entre os ano de 2006 e a previsão para 2015(fonte:ONS).

CAPACIDADE DE TRANSFORMAÇÃO- MVA			
Voltagem (kV)	2006	2015	%
750	21.000	37.350	77.9
500	63.053	98.605	73.2
440	15.252	22.236	45.8
345	27.288	35.754	31.0
230	45.164	66.897	48.1
TOTAL	171.757	260.842	51.9

Dessa forma, ocorrendo um incêndio em um transformador de potência como o mesmo comprometeria a missão e os objetivos deste sistema, principalmente em relação à capacidade de transformação? Analisando numa visão macroeconômica em que este sistema está inserido, pode-se afirmar que uma redução na capacidade de transformação resultaria numa redução do produto interno bruto (PIB), uma vez que o mesmo é função da demanda de energia elétrica.

Por outro lado, a estruturação para análise a ser desenvolvida fornece ferramentas efetivas para a organização dos complexos problemas identificados no setor elétrico.

Segundo, as incertezas; a nova maneira de pensar a ser desenvolvida no decorrer desse estudo ajuda a identificar importantes fontes de incertezas, ao mesmo tempo que propõem modelos e cenários para representar estas incertezas de forma sistemática.

Terceiro, múltiplos objetivos; o direcionamento do estudo proposto em uma direção, restringe o seu desenvolvimento em outras direções, por limitações, sobretudo, de tempo e recursos.

E finalmente porque diferentes perspectivas levam a diferentes conclusões; esta fonte de dificuldade é pertinente quando mais de uma pessoa está envolvida no processo, isto é, profissionais de diferentes áreas analisam o mesmo problema a partir de diferentes perspectivas.

Em subestações ou em usinas geradoras de energia, um incêndio em um transformador de potência pode ter como consequência a destruição parcial ou completa da infra-estrutura. A descontinuidade operacional, acarretam impactos diretos (pessoas e propriedades), multas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), além de custos de reposição e manutenção que podem atingir milhões de reais. Soma-se a isso os impactos indiretos como o meio ambiente (contaminação do solo, em caso de problemas de estanqueidade de transformadores em que um óleo mineral é usado como dielétrico), além da imagem da organização frente à consumidores e a sociedade em geral.

Incêndios em transformadores de potência aliados à inexistência de bacias de contenção podem ter como consequência, custos de limpeza e ações jurídicas bastante dispendiosas.

Ordenando numa escala os custos resultantes dos incêndios no setor elétrico, sobretudo em transformadores de potência tem-se: 1) perda de geração e/ou distribuição; 2) substituição de equipamentos destruídos ou danificados; 3) deslocação de equipamentos e instalação de uma nova unidade; 4) limpeza e reparação dos sistemas elétricos resultante do impacto da fumaça; 5) despesas de colocação em serviço dos equipamentos substituídos; 6) danos ambientais; 7) litígios jurídicos; entre outros.

Concluindo, a frequência dos incêndios em transformadores de potência tem aumentado e a divulgação na mídia tem como consequência imediata o direcionamento da atenção do público, em geral, para os seus efeitos sobre a saúde, segurança e meio ambiente.

Simultaneamente, a responsabilidade para acessar, avaliar e gerenciar os riscos de incêndios têm aumentado tanto no setor privado como público, visto que a percepção da necessidade para antecipar, prevenir e reduzir os riscos de incêndio está implícita na

sociedade moderna. Numa tentativa de assumir essas responsabilidades, os setores públicos e privados têm lidado com problemas complexos.

1.1 Justificativa

1.1.1 Objetivos

1.1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse estudo é entender a interação existente entre os incêndios em transformadores e o sistema elétrico, ou seja, garantir que a ocorrência de uma falha de equipamento ou erro humano que possam resultar em incêndios tenha um menor impacto na disponibilidade operacional do sistema.

Auxiliar técnicos e profissionais do segmento a formar uma opinião sobre as possíveis causas e conseqüências dos riscos de incêndio, ou seja, estabelecer um embasamento científico que se permita identificar, avaliar e prevenir os riscos de incêndios. Em outras palavras, desenvolver metodologias específicas que possam ajudar no entendimento da anatomia dos incêndios, e conseqüentemente no desenvolvimento de sistemas eficientes para o seu combate eficaz.

Em outras palavras é objetivo desse estudo propor metodologias para uma análise de risco, a qual integre a análise do sistema e a dinâmica dos incêndios. É esperado que essas metodologias ajudem os profissionais da área, que de muitas maneiras influem no desempenho dos incêndios, a tomarem melhores decisões no seu dia a dia, bem como a comunicar melhor o que está em risco.

1.1.1.2 Objetivos Específicos

- Acesso aos Riscos de Incêndios: Identificação do que está em risco, nesta etapa alguns questionamentos deverão ser respondidos, tais como: O que está em risco? O que é essencial para proteger o sistema? O que é aceitável? O que pode dar errado? Como pode dar errado? Quais alternativas para solucionar os perigos identificados?
- Análise Quantitativa dos Incêndios: Propor modelo teórico para a quantificação da energia liberada durante um incêndio em transformadores.
- Impacto dos Incêndios: Avaliará de forma integrada o impacto de um possível incêndio em um transformador e seu impacto sobre as pessoas, o sistema e a

sociedade. A análise de riscos quantificará a extensão dos danos causados pela propagação da chama.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos Básicos de Análise de Risco

Vários acidentes envolvendo incêndios em transformadores de potência ocorreram ao longo do tempo. Tais incêndios ocorrem em subestações, usinas termoelétricas, usinas hidroelétricas, na indústria de processamento, etc.

Após alguns destes acidentes ocorridos no passado recomendações de projeto, normas e códigos foram surgindo, os quais são baseados em falhas. Como conseqüências destes acidentes pode-se citar elevadas perdas humanas, falência de negócios e preocupação da sociedade.

Como soluções surgiram as recomendações sobre projeto, dimensões, sistemas de proteção entre outras. Por outro lado, para cada novo incêndio que ocorria, o mesmo deixava evidentes as limitações das recomendações, códigos e normas em vigor. Como resultado novas recomendações eram adicionadas as já existentes sem uma prévia avaliação. Ou seja, as recomendações estavam baseadas na experiência e, sobretudo em desastres. Dessa forma, tais recomendações não deixam claro quais as suas intenções.

Tais recomendações às quais doravante serão referidas como prescritivas surgiram num momento em que o contexto tecnológico e econômico era diferente do atual. Recomendações baseadas nos desempenhos implicam em avaliações dinâmicas, isto é, é necessário entender como o sistema reage dado haja uma falha.

Em avaliações dinâmicas, ou seja, por desempenho muito provavelmente não se é capaz de desenvolver todos os cenários para todas as possíveis condições envolvendo pessoas, propriedade e continuidade de operações. O potencial para falha e desenvolvimento de incêndios, está presente no setor elétrico, mais especificamente, no uso de transformadores de potência. Além disto, devido às limitações da tecnologia hoje disponível, em combinação com a percepção da sociedade em uma análise baseada no desempenho é necessário relatar uma história sobre a sinergia entre a falha e o sistema.

Desta forma a conceituação de alguns termos básicos de uma análise de riscos, os quais estarão presentes no decorrer deste estudo é o objetivo principal desta seção.

O AIChE (1992) (*American Institute for Chemical Engineering* - Instituto Americano dos Engenheiros Químico) que é uma instituição de referência internacional envolvida com a

segurança do processo das indústrias de processamento em geral, conceitua alguns termos básicos utilizados numa análise de risco:

- **Acidente, cenários de acidentes ou seqüência de acidente:** Evento ou seqüência de eventos não planejados que poderão resultar em conseqüência indesejável.
- **Análise de Risco:** Os esforços para identificar os perigos presentes em um processo, e para estimar os riscos são denominados. Mais freqüentemente, essa análise procura identificar perigos específicos, focando nas conseqüências às pessoas, à propriedade e ao meio ambiente.
- **Avaliação de Risco:** As estimativas fornecidas pela análise dos riscos são então usadas para ajudar na tomada de decisão, de forma a selecionar ou ordenar a(s) melhor(es) alternativa(s) para melhorar a segurança. Esta tarefa é definida como avaliação dos riscos, i.e., a maneira em que as estimativas feitas na fase da análise dos riscos são comparadas com critério de riscos, no sentido de comparar diferentes alternativas para aumentar a segurança de um processo.
- **Confiabilidade de Equipamento:** Probabilidade de que um equipamento irá desempenhar a sua função durante um intervalo de tempo sob condições operacionais normais.
- **Conseqüência:** Resultado de uma seqüência de eventos indesejáveis, em geral envolvendo incêndio, explosão ou derramamento de material tóxico.
- **Evento:** Uma ocorrência relacionada ao desempenho de um equipamento ou ação humana, ou ainda fatores externos, os quais podem causar falhas no sistema.
- **Evento Básico:** Evento que representa o nível mais baixo de resolução em um modelo, abaixo do qual não são necessário outros detalhamentos.
- **Erro:** Variação do desempenho de um sistema, que se encontra dentro dos limites do aceitável e do desempenho desejado.
- **Falha:** Diferença inaceitável entre aquilo que é esperado e o desempenho observado. Segundo o International Electrotechnical Commission, falha é definida como a impossibilidade de um item continuar desempenhando as suas funções. Os termos erro e falha são geralmente confundidos, além da conceituação acima a Figura 2.2 auxilia no entendimento da diferença entre eles:

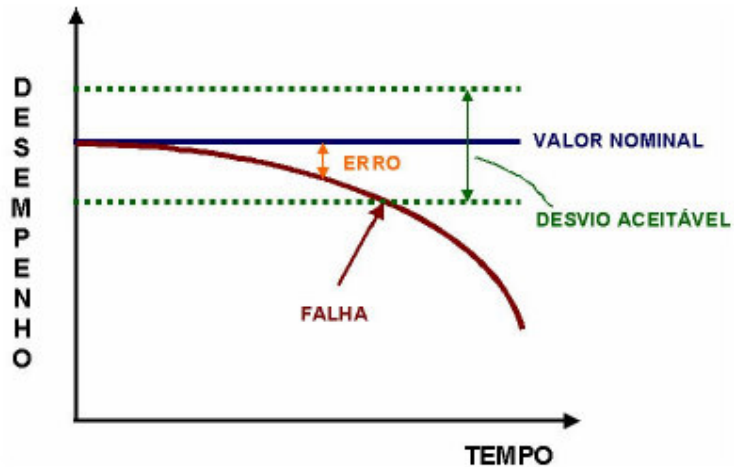


Figura 2.1 - Ilustração da diferença entre falha e erro.

- **Gerenciamento dos Riscos:** É uma tentativa de minimizar os efeitos negativos de alguns riscos indesejáveis, ou seja, preveni-los.
- **Gerenciamento dos Riscos por Desempenho:** Modelo de gestão baseado no entendimento do fenômeno físico associado seqüência de falhas. No presente estudo o fenômeno físico a ser estudado são incêndios.
- **Modo Comum de Falha:** Falha simultânea de dois ou mais equipamento devido a causa comum e externa ao sistema. Um tipo de falha dependente.
- **Modo de Falha:** Maneira como uma falha se manifesta. Um modo de falha poderá ser identificado como a perda de função, função sem demanda ou uma simples característica física, a exemplo de um vazamento observado durante uma inspeção. Segundo, o British Standard (Padrão Britânico) BS 5760, modo de falha é definido como o efeito pela qual a falha é observada.
- **Perigo:** Perigo é uma característica do sistema (física ou química) que tem o potencial para causar falha no sistema, ferimentos em pessoas, danos à propriedade e ao meio-ambiente, etc. Um perigo pode ser a combinação de material perigoso, condições ambientais e eventos não planejados que podem resultar em um acidente.
- **Risco:** Risco é o que pode dar de errado, probabilidade de ocorrência e consequência.
- **Sistema de Origem ou Sistema Genérico:** Equipamento ou conjunto de equipamentos que melhor representam as características do sistema.
- **Subunidade:** Componentes ou partes dos equipamentos presentes no sistema.

- **Unidade:** Equipamentos presentes no sistema.

Brown (1998), fornece ainda alguns conceitos pertinentes a uma análise de risco entre eles:

- **Disponibilidade:** é o intervalo de tempo em que um dispositivo e/ou sistema permanece operacional e sem falhas.
- **Efeito Dominó:** é a consequência decorrente de uma sucessão de eventos indesejáveis que possam ocorrer após um evento inicial.
- **Erro Humano:** é a falha na realização de uma tarefa conhecida, ou a realização de uma tarefa não autorizada que, possa resultar em danos em pessoas, meio ambiente, equipamentos, propriedade ou falha em operações programadas.
- **Frequência de Ocorrência:** é o número de ocorrências de um evento indesejável por unidade de tempo (nº de ocorrências/ano).
- **Indisponibilidade:** é a falta de disponibilidade operacional de um dispositivo ou sistema.
- **Plano de Ação de Emergência:** é um planejamento de medidas de emergência a serem implantadas por ocasião da ocorrência de uma emergência em uma instalação industrial.
- **Probabilidade:** é a possibilidade de ocorrência de um evento específico, expresso em percentagem ou sob forma de fração.
- **Risco Individual:** é a probabilidade anual que um indivíduo tem de morrer após a ocorrência de um acidente.
- **Risco Social:** é o risco à população presente na zona de influencia de um acidente.
- **Segurança:** é a habilidade de se executar funções e/ou atividades sem ocorrência de acidentes.
- **Taxa de Falha:** é a possibilidade de ocorrência de uma falha em um determinado intervalo de tempo.
- **Vulnerabilidade:** é a medida da extensão dos efeitos danosos aos seres humanos e materiais, decorrentes de incêndio, explosão e emissão tóxica ocorridos em instalações industriais.

2.2 Técnicas de Identificação de Perigos

A Identificação dos perigos é o processo pelo qual é feita uma investigação para detectar as características do sistema. A seguir, serão comentadas algumas técnicas usadas para a identificação de perigos recomendadas pela AIChE (1992). Tais técnicas largamente empregadas na indústria de processamento, podem ser adaptadas para o uso em subestações

de energia elétrica e usinas geradoras de energia, onde há o uso de transformadores de potência .

Dentre os vários métodos para a identificação de perigos disponíveis, serão empregados os diagramas contínuos e únicos, os quais serão detalhados a seguir. Os métodos de identificação dos perigos, e como eles podem ser materializados, podem ser divididos em três grupos, a saber: a) métodos comparativos, b) métodos fundamentais e c) métodos de diagrama das falhas lógicas. Na Tabela 2.1, é apresentado resumidamente os métodos de identificação dos perigos mais utilizados. Ressaltamos que, mesmo que a identificação dos perigos seja realizada ao longo do ciclo de vida do sistema, ela não garantirá que acidentes não ocorrerão.

Tabela 2.1-Métodos de identificação de perigos

Métodos de Identificação de Perigos	Métodos Comparativos	Checklists
	Métodos Fundamentais	APP
		What if
		HAZOP
		FMEA
	Métodos dos Diagramas das Falhas Lógicas	Árvore de Falhas
		Árvore de Eventos
Diagrama Contínuo e Único		

2.2.1 Métodos Comparativos

Os métodos comparativos são baseados na experiência, os quais são traduzidos em *checklists*(listas de verificação), procedimentos operacionais, normas, códigos, etc. Em especial, os checklists precisam de respostas específicas para certas questões e elas podem também estimular a reflexão. Apesar do uso de checklists ser um método valioso para a identificação dos perigos, ele contém várias questões que são por vezes irrelevantes para o problema, e também, na maioria das vezes, o uso de checklists requer um considerável tempo para ser elaborado. Os checklists deveriam ser usados antes de qualquer decisão e nunca depois da decisão a ser tomada, especialmente quando a decisão envolve questões incluídas nos checklists. Os checklists, apenas, não são suficientes para identificar os perigos e os meios pelos quais eles podem acontecer.

2.2.2 Métodos Fundamentais

Checklists são freqüentemente usados para identificação dos perigos, entretanto sua desvantagem é que os itens não incluídos no checklists não são discutidos e, na maioria das vezes, são ignorados. Checklists podem ser aplicados quando existe pouca ou nenhuma inovação, e quando todos os perigos já foram identificados em instalações similares. Os checklists tornam-se insuficientes quando existem inovações. Essa é a razão pela quais as indústrias químicas optam por técnicas mais criativas, baseadas em questões mais abertas.

Tais técnicas são o What if (O que se?), APP (Análise Preliminar de Perigos), HAZOP (*hazard and operability study* - identificação de perigos e operabilidade) e o FMEA (fail mode & effect analysis - análise de modos de falha e efeitos), os quais são estruturados no sentido de estimular um grupo de profissionais para identificar os perigos, baseados nos seus próprios conhecimentos e experiência.

De acordo com Lawley (1974) os principais objetivos do HAZOP são identificar todos os desvios operacionais possíveis do processo e também identificar todos os perigos e/ou riscos associados a esses desvios operacionais.

O HAZOP é um estudo qualitativo que fornece uma descrição completa do processo.

De um modo geral as seguintes questões são colocadas:

- *Qual a intenção do projeto?*
- *Quais são os desvios que podem acontecer no projeto inicial?*
- *O que pode causar desvios no projeto inicial?*
- *Quais são as conseqüências dos desvios no projeto inicial?*

A palavra projeto aqui deve ser entendida como condições de operação, condições de processo, funções da planta e localização da planta.

A análise de falha e efeito – FMEA explora a maneira pela quais os componentes de um equipamento podem falhar e o seu efeito na confiabilidade do sistema. Em geral, o FMEA não incorpora o erro humano, embora não exista uma razão específica para tal exclusão. O FMEA proporciona uma análise qualitativa e uma sistemática lista de modos de falha a nível de componente, e seus efeitos no sistema. Um das vantagens do FMEA é que o mesmo pode ser facilmente atualizado, com resultado de alterações no projeto ou outras modificações no processo. O mecanismo de falha, i.e., modo de falha, de um equipamento ou de seus componentes descreve como o equipamento e/ou seus componentes falham (ou seja, aberto, fechado, com vazamento, entre outros). O efeito do modo de falha é determinado pela resposta do sistema a falha do equipamento. O FMEA identifica modos de falha individuais

que contribuem direta ou indiretamente para um acidente. O FMEA não é eficiente para identificar possíveis modos comuns de falha que conduzam a acidentes.

Segundo Brown (1998) a análise preliminar dos riscos (APP) permite inicialmente identificar e analisar em forma abrangente os potenciais de riscos que poderão estar presentes na instalação analisada.

A técnica aplicada possui um formato padrão tabular, onde, para cada perigo identificado, são levantadas suas possíveis causas, efeitos potenciais, medidas de controle básicas para cada caso, a nível preventivo e/ou corretivo, tanto aquelas já existentes ou projetadas como aquelas a serem implantadas no estudo efetuado (conforme definições a seguir). Finalmente, os perigos identificados pela APP são avaliados com relação a sua frequência de ocorrência, grau de severidade e nível de suas consequências considerando os potenciais danos resultantes à pessoas, materiais (equipamentos e edificações) e a comunidade em geral.

A técnica what if, de acordo com Brown (1998) se baseia em conduzir um exame sistemático de uma operação ou processo através de perguntas do tipo “O que aconteceria se ...” e, com isto, permitir a troca de idéias, favorecendo a reflexão e a associação dessas idéias. Uma limitação que está presente em todas as técnicas dos métodos fundamentais é o excessivo tempo gasto para se concluir a análise.

2.2.3 Métodos dos Diagramas Lógicos das Falhas

As árvores das falhas e dos eventos representam os métodos dos diagramas das falhas lógico tradicionais. A árvore das falhas é geralmente usada para definir todos os caminhos possíveis que podem levar para um tipo de falha particular e, a árvore dos eventos, é usada para descobrir os caminhos possíveis pelos quais certa falha possa acontecer.

Os métodos de identificação de perigos, Tabela 2.1, objetivam identificar materiais, sistemas, procedimentos e características de um determinado processo que podem produzir consequências indesejáveis. Cada parte do sistema é avaliada individualmente de modo que não é possível perceber como um simples evento em uma parte específica do sistema poderá afetar outros lugares, e/ou o sistema inteiro, como na árvore das falhas e dos eventos.

A árvore das falhas mostra uma seqüência lógica de falhas independentes, que irão levar ao evento principal, Uma de suas limitações é que os ramos da árvore devem ser independentes, e isso se torna uma limitação na identificação de perigos. comuns. Outras limitações da árvore das falhas é a dificuldade inerente para tratar com as propriedades temporais de um acidente, ou seja, a seqüência com que os eventos ocorrem.

Esta dificuldade não esta presente na árvore dos eventos. Por outro lado, a árvore dos eventos apresenta dificuldades na visualização de possíveis eventos que podem levar a um

acidente. Portanto, se faz necessário um método que incorpore as vantagens das árvores das falhas e a árvore dos eventos juntos. Com o uso dos diagramas contínuos e únicos, inicialmente propostos por Fitzgerald(1992), esclarece a seqüência de eventos, onde o tempo e condicional idade são incorporados.

Os diagramas contínuos iniciam-se com um evento específico e identifica a seqüência de eventos que surgem a partir do evento inicial, pela sua ordem de acontecimento. Já os diagramas únicos permitem, parar a variável tempo e analisar em detalhes um único evento do diagrama contínuo. Em outras palavras, o diagrama contínuo nos permite representar a seqüência de eventos, identificando condicionalidade entre eventos e incorporando o tempo no processo. O diagrama único nos permite alterar a escala da variável tempo a qualquer instante para analisar as causas ou condições daquele instante.

Dessa forma os diagramas contínuos e únicos serão as técnicas utilizadas na identificação dos perigos de incêndio e o desenvolvimento dos cenários de incêndio em transformadores de potência, presentes no capítulo seguinte.

2.3 Transformadores de Potência: Conceito

A análise de causa e conseqüências a respeito dos perigos de incêndio será realizada em transformadores de potência, sendo necessário uma breve conceituação e descrição do equipamento, incluindo suas partes constituintes e suas proteções contra incêndio.

De acordo com Mamede(1994), estes componentes do sistema elétrico são responsáveis pela interligação entre as linhas de transmissão e as redes de distribuição, transformando a alta tensão em baixa tensão ou vice-versa. A capacidade de transferência de energia de um lado para o outro é determinada pela sua potência.

Segundo a NFPA 70B (2006), um transformador é um equipamento que transforma energia em um sistema de corrente alternada de uma voltagem para outra. Os transformadores são um elo vital em um sistema eletromagnético, sendo também um dos mais confiáveis.

Os transformadores de potência são os componentes mais dispendiosos e críticos das subestações.

As suas falhas podem causar prejuízos consideráveis ao fornecimento de energia às instalações elétricas. O parque elétrico nacional possui um expressivo número destes equipamentos instalados cuja idade aproxima-se da fase de envelhecimento, o que justifica um maior número de inspeções e investimentos efetuados com a finalidade de se manter a

confiabilidade desejada. A probabilidade de falha é pequena quando os transformadores operam nas condições nominais de projeto. Por outro lado, falhas em transformadores são em geral sérias, e poderão resultar em incêndios ou explosões.

Os transformadores são de uma importância vital, tanto para a distribuição como para o transporte de energia elétrica. O que acontece com a generalidade das pessoas é que poucas estão cientes de que as falhas de abastecimento podem ocorrer. Explosões ou incêndios por vezes podem ocorrer inesperadamente nas redes de abastecimento. Quando tal ocorre, as consequências provenientes de catástrofes inerentes a estes tipos de incidentes podem ter repercussões consideráveis, tanto para as companhias de energia elétrica como também para a comunidade em geral.

Segundo Mamede (1994), os principais componentes de um transformador são o núcleo, os enrolamentos, o reservatório ou tanque, o radiador e as buchas. O núcleo do transformador é um material ferromagnético que fornece uma alta permeabilidade magnética do primário para o secundário. Os enrolamentos permitem que uma tensão induzida apareça nos terminais do secundário devido a uma excitação alternada nos enrolamentos do primário. O reservatório ou tanque que normalmente é uma estrutura retangular reforçada, contém o fluido dielétrico e os enrolamentos. O radiador fornece calor. As buchas isolam os terminais do primário e secundário. A Figura 2.2 mostra um transformador de potência utilizado em uma subestação.

Os tipos de dielétrico utilizados incluem ar, sólidos de isolamento(transformadores a seco), óleo mineral(hidrocarbonetos), e ascarel (hidrocarbonetos clorados), que deixou de ser utilizado por ser muito tóxico e muito perigoso para o meio ambiente.



Figura 2.2 – Transformador de potência em uma subestação de energia.

2.4 Proteção Contra Incêndios para Transformadores

A severidade de um incêndio ou explosão em uma subestação, ou mais especificamente de um transformador de potência que é o equipamento dentro de uma planta deste tipo que oferece a maior probabilidade de incêndio, bem como incêndios e explosões de maiores magnitudes; é função de suas proteções passivas, isto é, bacia de contenção, paredes corta fogo, sistema de spray utilizando água e espuma, e distâncias mínimas de separação entre transformadores e estruturas adjacentes.

2.4.1 Paredes Corta-Fogo

As paredes corta fogo são estruturas de concreto utilizadas para absorver o impacto térmico proveniente de um incêndio, protegendo assim equipamentos e estruturas próximas à fonte do calor.

A Figura 2.3 mostra a configuração da parede corta-fogo em relação às estruturas adjacentes. Segundo a NFPA 850, a parede corta-fogo deve estar a pelo menos 31cm acima do transformador e do reservatório do óleo mineral, e 60cm além de sua largura (tanque principal incluindo os radiadores).

Deve-se por questão de segurança adotar que a altura mínima de 31cm acima do transformador deve ser considerada a partir da bucha de alta, ou seja, além da parte mais alta do transformador.

As normas japonesas para subestações JEAG 5002, *Japanese Electrical Association* (Associação Elétrica Japonesa) recomendam que a altura da parede corta fogo seja igual ou maior que a altura do componente mais alto do transformador. E que a largura da parede corta fogo seja 4m maior do que a largura do transformador, Figura 2.4.

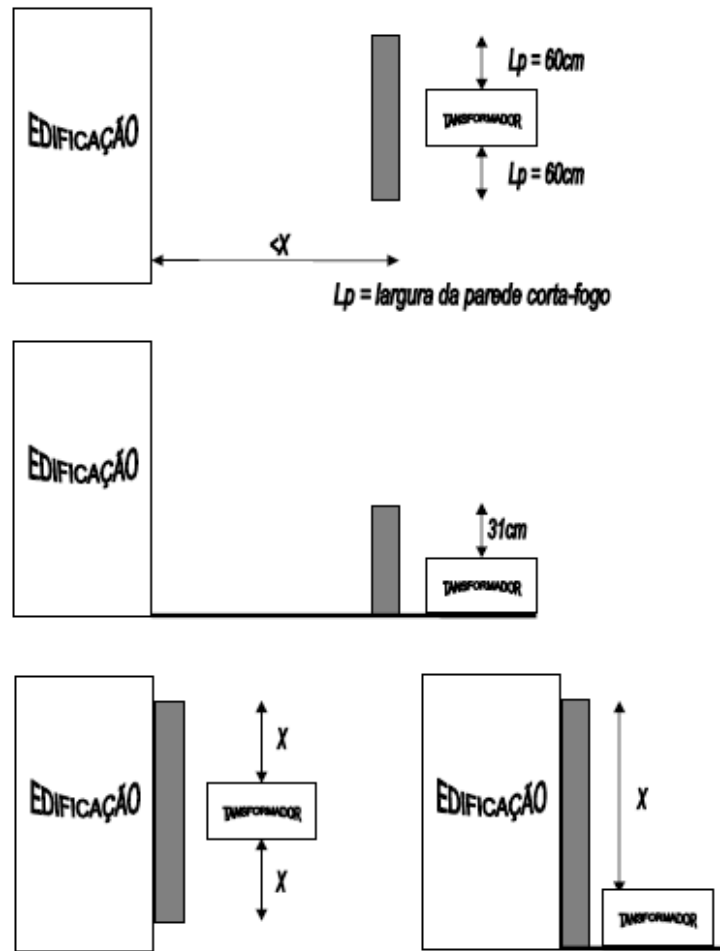


Figura 2.3 - Altura da parede corta-fogo segundo NFPA 850.

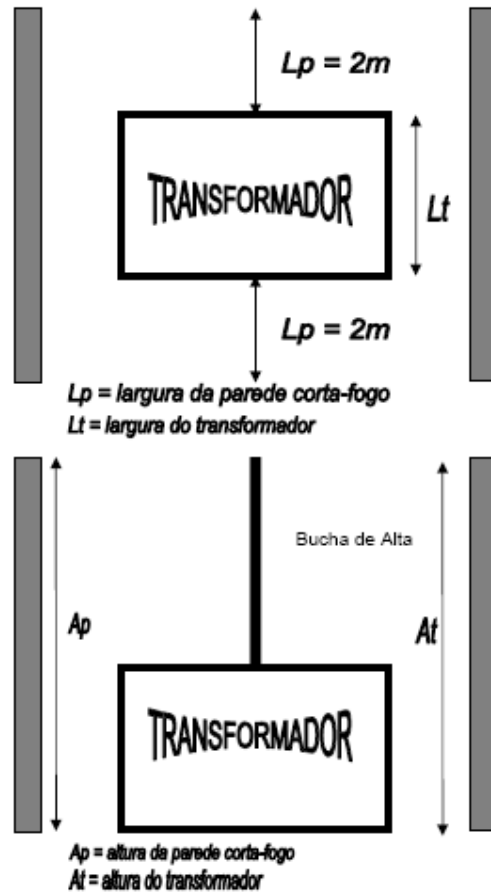


Figura 2.4 - Largura da parede corta-fogo segundo JEAG 5002.

A NFPA 850 recomenda que as paredes corta-fogo devem ser dimensionadas para resistir a uma explosão das buchas. Contudo não dá qualquer indicação da pressão que a parede corta-fogo deve ser capaz de resistir, ou seja a NFPA 850 não faz menção ao impacto mínimo das ondas de choque proveniente da explosão do transformador.

2.4.2 Distâncias Mínimas de Separação

Recomendações sobre as distâncias mínimas de separação entre transformadores a óleo e outras estruturas podem ser encontradas na NFPA 850. As mínimas distâncias de separação apresentadas na NFPA 850 estão baseadas: 1) no tipo e quantidade de óleo do transformador, 2) estimativas sobre as dimensões do vazamento, 3) características das estruturas adjacentes, 4) potência do transformador, 5) proteções contra incêndios existentes, e 6) proteções elétricas. As distâncias de separação entre transformadores e os edifícios e/ou equipamentos recomendados pela Factual Mutual Loss Prevention (Data 14-8) é abaixo

reproduzida na Tabela 2.2. Vale ressaltar, que as distâncias sugeridas pela Factual Mutual estão em conformidade com a NFPA 850, e com a orientação dada pelo Instituto dos Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE Std 979-1994 item 4.4.1).

Tabela 2.2 - Distâncias mínimas de separação entre transformadores e outras estruturas adjacentes.

Volume Óleo (cm ³)	Distância Horizontal - metro		
	Construção Resistente Chama	Construção Não Combustível	Construção Combustível
1,9	0,9	4,6	7,6
1,9 – 19	4,6	7,6	15,2
> 19	7,6	15,2	30,6

2.4.3 Diques de Contenção

Rupturas do tanque, no comutador, nas buchas ou em outras partes do transformador, ocasionam vazamento do óleo mineral contido no mesmo.

Os diques de contenção são reservatórios sem comunicação com o meio ambiente, que tem como função armazenar o óleo mineral do transformador em caso de vazamentos.

Incêndios em transformadores, em geral resultam da ruptura do tanque principal. Dependendo da sua potência e localização grande quantidade de óleo poderá espalhar-se pelo solo resultando em uma explosão dos líquidos aquecidos e vapores do óleo do transformador (boiling liquid expand vapor explosion-BLEVE), caso o óleo deposite-se e queime na parte inferior do transformador, Figura 2.5.

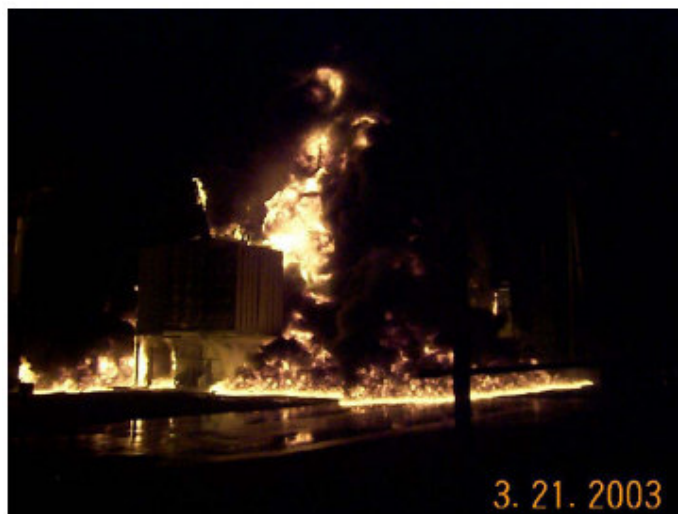


Figura 2.5 - Incêndio em transformador de potência.

2.4.4 Sistema de Spray Utilizando Água e Espuma

O agente mais comumente usado para extinguir e controlar um incêndio em um transformador é a água sob pressão em forma de gotículas. Ou melhor, um sistema confiável de água destinada a incêndios é conectado a um sistema fixo de tubos, o qual é equipado com esguichos que tem por objetivo fornecer um caminho apropriado para a descarga de água sob pressão em gotículas sobre o transformador. Os tubos são conectados ao suprimento de água através de válvulas automáticas que dão início ao fluxo de água até o esguicho. Estas válvulas atuam através de detectores de calor localizados ao redor do transformador. Algumas vezes devido a elevada velocidade do vento ou a má localização dos sensores, estes podem demorar mais do que o necessário para ativar as válvulas, este atraso poderá permitir que o sistema a ser instalado torne-se inoperante. Logo é recomendado que o sistema de “spray” a ser projetado e instalado incorpore as recomendações contidas na NFPA 15.

Por outro lado, segundo a NFPA 850 item 5-8.6 sistemas de espuma podem ser usados para extinguir incêndios em transformadores. Este sistema é ativado de modo semelhante ao sistema de água. A vantagem do sistema de espuma é que ele forma um cobertor de espuma sobre a área envolvida pela chama, facilitando assim a retirada do oxigênio disponível, contribuindo assim para reduzir a velocidade de propagação da chama. A desvantagem é que todos os tipo de espuma são condutivas, assim não é aconselhável que sejam usadas no combate a incêndios em equipamentos energizados. Soma-se a isto o fato de que o custo de limpeza da espuma após a extinção do incêndio é significativa.

O sistema de spray utilizando água e espuma é um tipo de proteção que gera bastante controvérsia sobre sua funcionalidade. Pois, para o perfeito funcionamento e operação de tais sistemas existem incertezas para seu sucesso controlar o incêndio,tais como:

- A água que compõe tal sistema de proteção pode ser ejetada sob pressão e na quantidade necessária para extinguir o incêndio?
- Até que ponto o sistema de spray utilizando água ou espuma é capaz de extinguir o incêndio ou apenas minimizar o impacto em relação ao equipamento afetado e ao meio ambiente?
- Os sensores de calor estão localizados corretamente no transformador, para uma rápida e eficaz detecção?
- Até que ponto esses sensores de calor são suscetíveis a fatores externos tais como: vento e condições climáticas?

Sabe-se que a eficácia deste sistema, está relacionada a quando o mesmo for ativado antes que a propagação e o tamanho da chama cresça e da manutenção desse sistema, afim de que o mesmo funcione corretamente após anos sem necessidade de uso.

2.5 Buchas de Alta Tensão

Segundo Mamede(1994) buchas de passagem são elementos isolantes próprios para instalações em cubículos metálicos de alvenaria e em equipamentos diversos, cuja finalidade é permitir a passagem de um circuito de determinado ambiente para outro.

Além dos componentes usuais, as buchas podem ser utilizadas em outros recursos auxiliares com por exemplo nos transformadores de corrente.

As buchas são utilizadas nos terminais do primário e do secundário em transformadores de potência. A Figura 2.6 ilustra uma bucha de alta tensão.

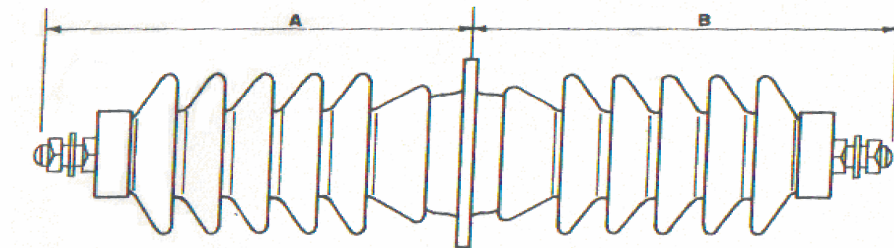


Figura 2.6 – Bucha de Alta Tensão

2.6 Disjuntores

De acordo com Colombo (1986), disjuntores, são chaves ou dispositivos de manobra com capacidade suficiente para fazer frente às solicitações que ocorrem quando do estabelecimento ou desligamento de equipamentos ou partes da instalação em estado normal de funcionamento ou não e, em especial sob condições de curto circuito e sobrecorrente.

O disjuntor ainda pode ser definido como um dispositivo mecânico de manobra, capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes nas condições normais do circuito, assim

como estabelecer, conduzir durante um tempo especificado e interromper correntes sob condições anormais especificadas do circuito (curto circuito e sobrecorrentes).

O disjuntor, ver Figura 2.7 é uma das proteções do sistema elétrico a um transformador de potência.



Figura 2.7 – Disjuntor de Potência

3 CAUSAS DE INCÊNDIO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

3.1 Análise Histórica

Dados sobre falhas em equipamentos são muito importantes em várias engenharias e na análise de manutenção. Projetos incorretos ou uma manutenção deficiente afetam a segurança e o meio ambiente, ao mesmo tempo em que eleva os custos da operação e de manutenção a níveis inaceitáveis.

Cenários, conforme mencionado no Capítulo anterior são a seqüência de eventos não desejáveis que podem resultar em incêndios e/ou explosões.

Assume-se que uma subestação ou uma usina geradora de energia (sistemas que utilizam transformadores de potência) representam sistemas com muitas partes (ou seja, subsistemas ou unidades) que interagem entre si e com meio ambiente. Para entender como os incêndios acontecem é necessário visualizar as interações entre os subsistemas. A existência de muitos subsistemas não é problema para os engenheiros que projetaram e operam a planta, se as interações são previsíveis e óbvias, ou melhor, desejáveis. Em outras palavras, enquanto algumas interações são familiares outras não são visíveis ou não são compreendidas de imediato.

Os projetistas poderão antecipar algumas interações indesejáveis outras não. Algumas dessas interações poderão resultar em uma seqüência de eventos que poderá conduzir a um incêndio. As interações não desejáveis poderão ser prevenidas.

Tendo por intenção melhorar a disponibilidade dos transformadores e a eficiência do sistema alguns sistemas automáticos de controle são necessários. Além disso, talvez não haja tempo suficiente para os operadores de campo atuarem nos instantes que antecedem uma situação de emergência.

Em outras palavras, a complexidade dos sistemas automatizados aumenta a probabilidade de erros humanos no decorrer do projeto, provavelmente por que há um aumento do número de interações não desejáveis.

As interações não planejadas quando combinadas com outros eventos podem resultar em incêndios e explosões. Por outro lado, se o lay-out é deficiente ou se os sistemas de proteção são sub-dimensionados o incêndio poderá atingir níveis incontroláveis.

Uma breve análise histórica dos incêndios em transformadores de potência é mostrada na Tabela 3.1, incluindo o local da ocorrência, uma descrição sucinta do incêndio bem como os impactos causados por tal ocorrência.

Tabela 3.1-Breve análise histórica de incêndios em transformadores de potência

Local/Data	Descrição Sucinta	Impacto
Tucuruí (Outubro/1994)	Devido a um surto de manobra, houve um incêndio em um transformador elevador de 378MVA, 13.8/500kV.	Perda total do transformador e danos à subestação blindada.
Rio de Janeiro(Janeiro/1997)	Um curto-circuito provocou a explosão de dois transformadores na subestação de Adrianópolis.	Dez municípios do estado do Rio de Janeiro, tiveram o fornecimento de energia elétrica interrompido.
Tucuruí (Maio/1998)	Devido a um surto de manobra, houve um incêndio em um transformador elevador de 378MVA, 13.8/500kV.	Perda total do transformador e danos à subestação blindada.
Tucuruí (Agosto/2002)	Devido a um surto de manobra, houve um incêndio em um transformador elevador de 378MVA, 13.8/500kV.	Perda total do transformador e danos à subestação blindada.
Goiana (Novembro/2003)	Um princípio de incêndio na subestação do aeroporto da CELG.	Interrompeu o fornecimento de energia durante 1h10min em Goiana.
Magé (Janeiro/2004)	Incêndio em um transformador de potência na subestação de Furnas.	500MW indisponibilizados durante 15 minutos e algumas localidades ficaram sem energia elétrica durante 1 hora.
São Paulo (Março/2004)	Incêndio em um dos transformadores da subestação de Pirituba.	Bairros da zona norte de São Paulo ficaram sem energia elétrica durante 1 hora e 30 minutos
Santos (Agosto/2004)	Um incêndio ocorrido devido a uma falha em um disjuntor de um dos transformadores da Subestação Vila Nova da CPFL	Deixou sem energia elétrica cerca de seis bairros da cidade por pelo menos uma hora e meia. Alguns pontos só tiveram o fornecimento restabelecido depois de duas horas

Campina Grande (Janeiro/2005)	Uma explosão de um disjuntor de associado a um transformador, na subestação de Campina Grande II, na Paraíba.	Paralisação no fornecimento de energia de 39 minutos, deixou 573 mil consumidores do Rio Grande do Norte e da Paraíba sem energia elétrica.
Tucuruí (Fevereiro/2005)	Incêndio no transformador elevador da usina de Tucuruí (ELETRONORTE)	Indisponibilizou 600MW. Esse incêndio causou danos aos periféricos: transformador auxiliar e subestação blindada, na bucha de alta tensão e subestação blindada do transformador. Os custos de reposição foram estimados em 40 milhões de reais.
Marabá (Fevereiro/2005)	Problemas na bucha resultaram em um incêndio no autotransformador de 550kV, 100MVA.	Imagem da organização(A subestação de Marabá é considerada estratégica, tendo em vista que fornece energia a outros consumidores relevantes à Serra dos Carajás).

Dessa forma, serão explorados neste capítulo cenários de incêndios em transformadores.

3.2 Falhas em Transformadores de Potência

No período de 1994 a 1996 o Grupo Coordenador Para Operação Interligada - GCOI, através da Comissão de Desempenho de Equipamentos e Instalações - CDE, publicou o Relatório Técnico sobre a Análise Estatística de Desempenho de Transformadores.

O objetivo dessa pesquisa e análise foi estabelecer indicadores de desempenho para o projeto, operação e manutenção dos transformadores. Participam dessa pesquisa vinte empresas: CEB, CEEE, CELESC, CELG, CEMAT, CEMIG, CERJ, CESP, CHESF, COPEL, CPFL, ELETRONORTE, ELETROPAULO, ELETROSUL, ENERSUL, ESCELSA, FURNAS, ITAIPU, LIGHT, ELETROBRAS, envolvendo aproximadamente 12.500 unidades-anos, em equipamentos com classe de tensão igual ou superior a 69 kV.

Esse estudo mostrou que aproximadamente 80% das falhas dos transformadores estão concentradas em quatro componentes: dispositivos de proteção própria, comutador de derivações em carga - CDC, bucha e enrolamento, Figura 3.1.

Os dispositivos de proteção própria são um conjunto formado por todos os dispositivos de proteção (tais como: relé de gás, termômetro de óleo, termômetro do enrolamento, relé de pressão, relé de proteção do comutador, relé de carcaça, entre outros) instalados no transformador que possuem a função de desligamento. Os comutadores do enrolamento são utilizados para mudar a relação de tensões do transformador e podem ser classificados em dois tipos: 1) comutadores de derivações em carga (CDC) e 2) comutadores de derivações sem tensão (CDST). O comutador de derivação é um equipamento essencial para o controle de tensão e fluxo de potência reativa no sistema elétrico.

A bucha é uma peça de material isolante que assegura a passagem isolada de um condutor através de uma parede não isolante.

O enrolamento faz parte do circuito magnético do transformador, o qual tem a função de transferir energia eletromagnética nas condições normais especificadas, incluindo sobrecarga e sobre-exitação permitidas por normas, isto é, sem gerar sobreaquecimento, perdas excessivas, formação anormal de gases e vibrações elevadas.

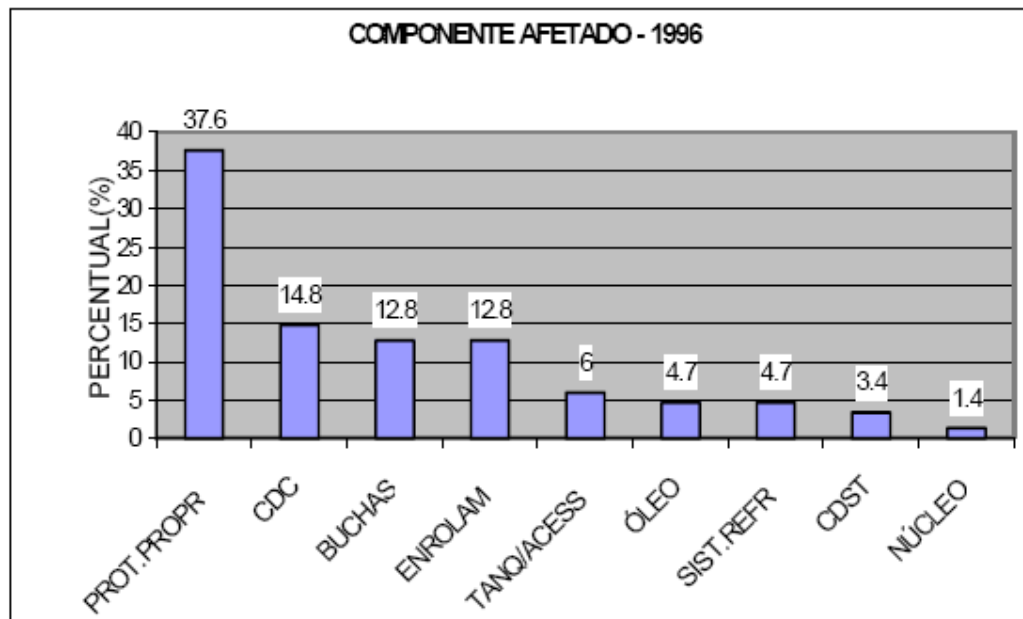


Figura 3.1 - Percentual da taxa de falha de transformadores por componente (GCOI-1996).

A CHESF realizou estudo semelhantes ao realizado pelo GCOI em transformadores de classe de tensão igual ou superior a 69 kV, instalados nos estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí, todos pertencentes ao sistema próprio. Conforme pode ser observado na Figura 3.2, 56,5% das falhas estão concentradas em um único item: proteção própria.

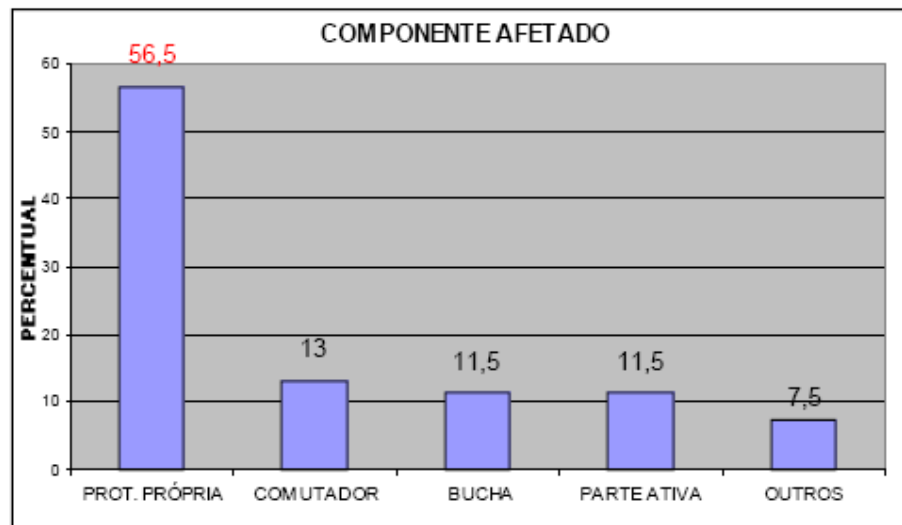


Figura 3.2 - Percentual da taxa de falha de transformadores por componente (CHESF).

Concluindo, os estudos realizados pelo GCOI e CHESF demonstraram que as falhas em transformadores de classe de tensão igual ou superior a 6,9 kV têm origem em um dos quatro componentes: a parte ativa, a proteção própria, o comutador de derivações e a bucha. Esses resultados são relevantes para a prevenção de paradas não programadas envolvendo transformadores.

Vale ressaltar, que falhas na parte ativa, proteção própria, comutador e bucha poderão resultar em explosão e incêndio do transformador. A causa mais comum de incêndios em transformadores está associada a falhas na parte ativa segundo Zalosh(2003), em especial nos enrolamentos.

Em outras palavras, o aquecimento por correntes parasitas no circuito magnético poderá resultar em uma degradação do isolamento das lâminas, degradação do isolamento das espiras do enrolamento e degradação do isolamento das ferragens. As falhas com origem no circuito magnético, em geral, possuem características de efeito cumulativo e vão se agravando

lentamente ao longo do tempo, elas podem ser detectadas preditivamente através da análise gás-cromatográfico do óleo.

As principais causas de falhas no circuito magnético são relacionadas a seguir:

1. Deficiência no isolamento dos parafusos passantes provoca curto-circuito entre as lâminas produzindo correntes parasitas. Os parafusos passantes atravessam as lâminas do núcleo, ferragens e jugo, e possuem a função de fixar o núcleo e manter as lâminas unidas. A falha de dois ou mais parafusos poderá resultar na elevação das correntes que circulam nos parafusos. Correntes elevadas provocam aquecimento local ou generalizados, como resultado danos no isolamento das bobinas poderão resultar em um curto-circuito entre espiras adjacentes;

2. As ferragens utilizadas na fixação do núcleo e lâminas poderão não possuir isolamento adequado, ou devido a vibrações o isolamento poderá ser degradado dando origem a correntes parasitas que provocam a carbonização do óleo (ou seja, degradação do óleo isolante) e formação de pontos aquecidos. A formação de pontos quente resultará na formação de gases, os quais podem provocar a atuação do relé de gás;

3. Nas passagens do fluxo magnético pelas lâminas do núcleo verificam-se contrações e alongamentos (isto é, magnetotristão) das mesmas, os quais resultam em folgas no núcleo, ou seja, vibrações. As vibrações originadas pelas passagens do fluxo magnético através do núcleo podem provocar a quebra dos parafusos de sustentação e sérios danos no isolamento das bobinas;

4. Durante o processo de fabricação poderão ocorrer falhas no corte das lâminas do núcleo devido ao uso de ferramentas de corte gastas, talvez pelo seu uso excessivo. O uso de ferramentas de cortes degradadas poderá dar origem a rebarbas superiores ao limite aceitável de 0,03mm ou ainda ser responsável pela presença entre as lâminas de pequenos resíduos fabris. A existência de rebarbas ou resíduos fabris podem dar origem a um curto-circuito entre as lâminas, conduzindo a aquecimento anormal no núcleo;

5. A operação do transformador com tensões superiores às nominais, sem acréscimo da frequência, poderá provocar a saturação do núcleo, ou seja, um acréscimo das perdas no ferro e aquecimento do núcleo.

Concluindo, além das atuações do relé de gás e dos danos no isolamento das bobinas, os problemas no núcleo causam também um grande transtorno para os resultados das análises gás-cromatográfico, pois provocam o mascaramento dos resultados das análises, dificultando a análise e o diagnóstico.

Dado que haja uma falha se as proteções de intertravamento do transformador não atuarem isolando o transformador do sistema a corrente indesejável (ou seja, as correntes parasitas) poderá se desenvolver dando origem a um arco ou curto-circuito.

3.3 Cenários de Incêndio em Transformadores

Normalmente o óleo usado em transformadores de subestações possuem um alto ponto de fulgor, logo é classificado como líquido combustível classe IIIB, segundo a ANSI *American National Standards Institute* (Instituto Nacional Americano de Padrões)/NFPA 30-1993.

Devido ao seu elevado ponto de fulgor o óleo usado nos transformadores pode ser manuseado ou estocado de forma segura.

Por outro lado, quando usado em equipamentos elétricos seja para remover o calor resultante das perdas ou como dielétricos entre os componentes ativos condutores de corrente, este adquire qualidades não combustíveis.

Três componentes, combustível, oxigênio e calor, devem existir ao mesmo tempo para causar um incêndio em um transformador. Possíveis materiais combustíveis usualmente presentes no transformador são óleo mineral, cabos (cabos interno ao transformador) e materiais celulósicos. Vapores combustíveis são gerados pela decomposição do óleo, devido a uma sobrecarga térmica de origem interna ou externa. Para os transformadores localizados no pátio da subestação é óbvio que o suprimento de oxigênio é abundante. Como possíveis fontes externas de calor, isto é, fontes de ignição, temos a considerar cabos super aquecidos devido a sobrecarga ou degradação; raios; exposição ao fogo, ou seja possivelmente de um incêndio em transformador adjacente ou em outro equipamento. A Figura 3.3 ilustra uma árvore de falhas das mais prováveis causas de incêndios em transformadores.

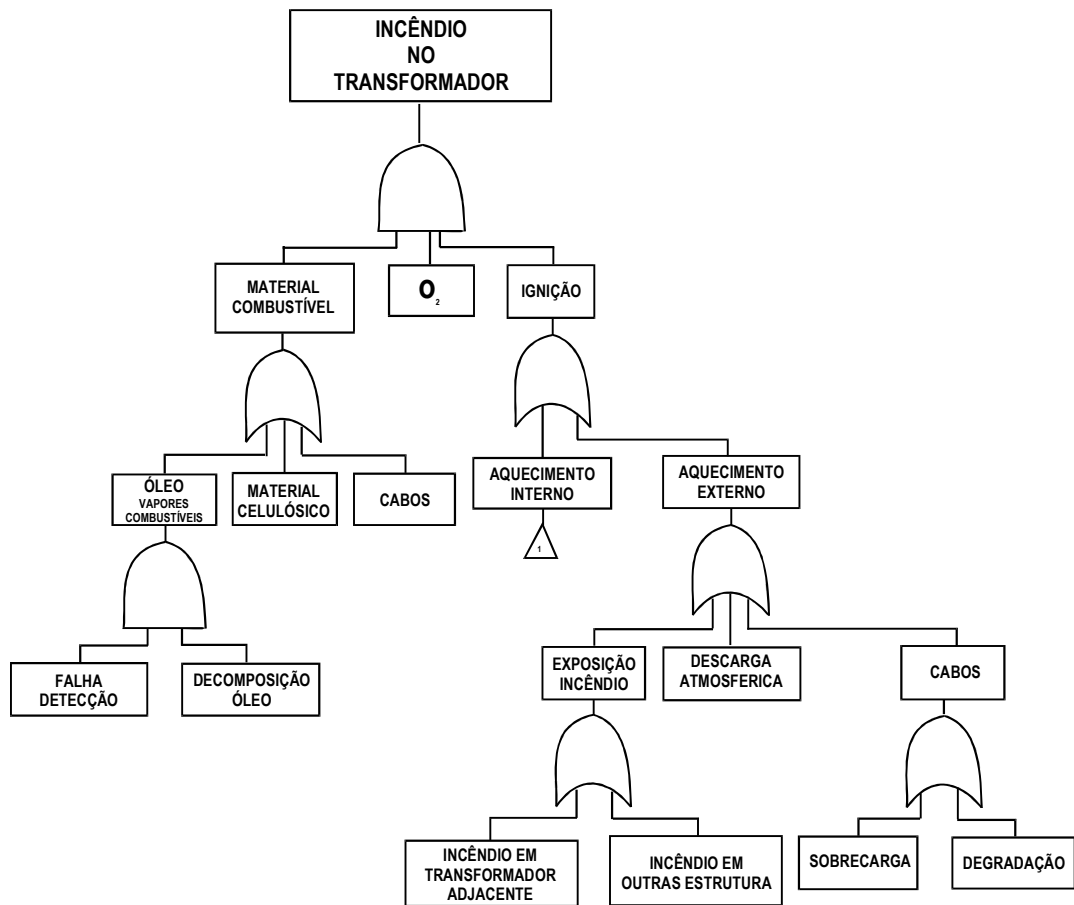


Figura 3.3 - Árvore das falhas para incêndio em transformadores.

O nó 1 da árvore de falhas acima se trata do aquecimento interno como fonte de ignição, elemento constituinte de um possível incêndio em um transformador de potência. Por sua vez na Figura 3.4 encontra-se a árvores de falhas que leva ao aquecimento interno. Uma árvore de falhas pode ter sua complexidade reduzida ou aumentada de acordo com o nível de detalhamento desejado.

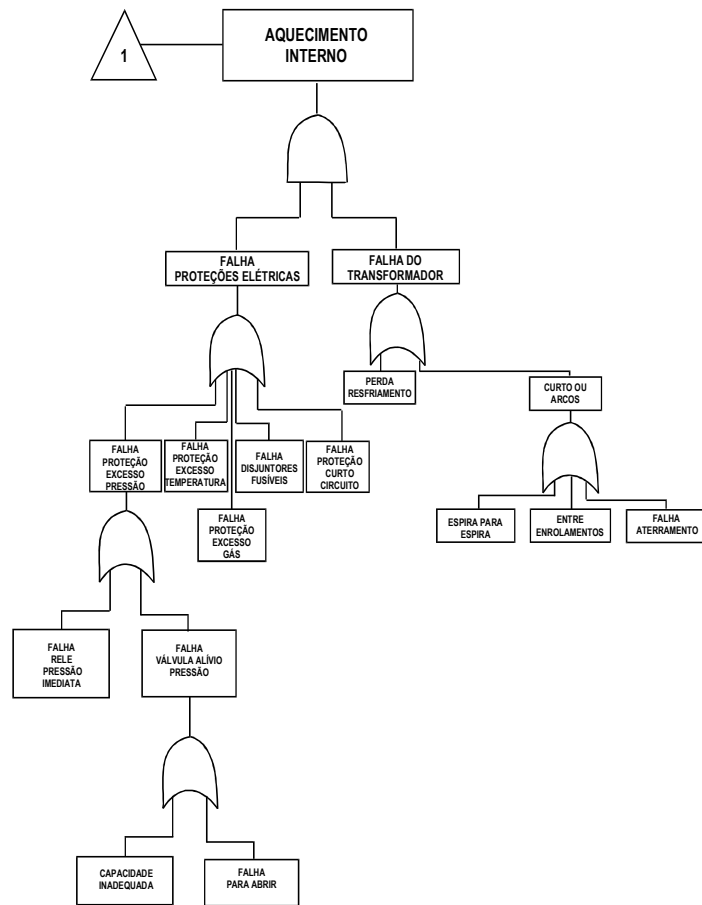


Figura 3.4 - Árvore das falhas para incêndio em transformadores (aquecimento interno).

Segundo Zalosh (2003), existem alguns cenários de incêndios em transformadores que ocorrem com maior frequência, abaixo estão alguns deles.

O Cenário mais comum em transformadores de potência (este cenário pode ser melhor compreendido após a seção 3.5 Figura 3.16) que possuem um reservatório contendo um algum tipo de fluido atuando como dielétrico, ocorre quando existem avarias e degradação no isolamento nos enrolamentos do transformador. As falhas nos enrolamentos acarreta uma diminuição na impedância das bobinas, este fato somado a possíveis falhas na proteção elétrica que deixam de isolar corretamente o transformador, faz com que a corrente elétrica aumente gerando arcos elétricos. O arco elétrico decompõe o fluido existente no reservatório do transformador, gerando gases em forma de bolhas que se expandem. A pressão e o volume deste gás causa o aumento da pressão do líquido dielétrico até o ponto em que o reservatório que abriga o fluido começa a se deformar, geralmente num dos cantos do tanque. Essa deformação e pode causar a ruptura do tanque, liberando violentamente o fluido do transformador e o produto gerado pela decomposição dos gases. Essa mistura em contato com

partes dos condutores, dos enrolamentos ou de restos quentes da isolação pode inflamar o óleo e o vapor liberados do transformador. O resultado pode ser um incêndio do tipo spray da queima do líquido liberado. Este cenário está ilustrado abaixo na Figura 3.5.

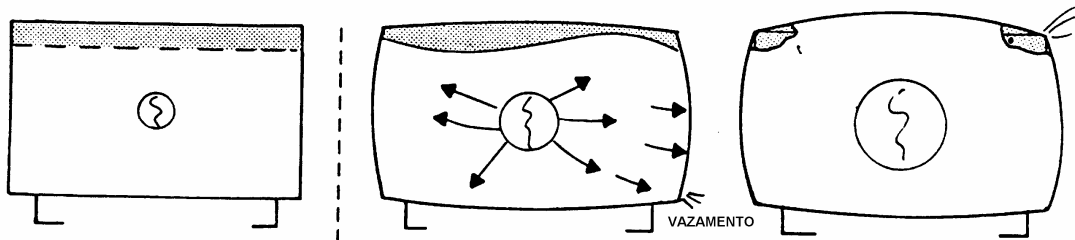


Figura 3.5 - Ilustração do cenário em que houve a degradação do fluido presente no reservatório do transformador.

Neste cenário o produto da decomposição dos gases, é o acetileno. A presença de monóxido de carbono e dióxido de carbono poderá ser o resultado de um superaquecimento do material celulósico isolante.

Esses gases são gerados por várias causas, as quais estão relacionadas na Tabela 3.2, podendo eventualmente alcançar uma determinada concentração capaz de provocar um incêndio ou explosão. Soma-se a isto o fato de que a contaminação do óleo com água afetará a sua rigidez dielétrica o que poderá resultar em um incêndio. Logo, os vapores combustíveis são um motivo de preocupação quando não devidamente detectado e as medidas cabíveis tomadas.

Tabela 3.2 - Produtos gerados na decomposição do dielétrico, do material e de agentes contaminantes do dielétrico devido de falhas elétricas

	Falhas Elétricas	Gases
Ó L E O	Arco	Acetileno
	Corona	Hidrogênio e Metano
	Superaquecimento	Etileno
P A P E L	Corona	Hidrogênio Monóxido de Carbono
	Superaquecimento	Dióxido de Carbono
ÁGUA	Eletrólise	Hidrogênio

Um segundo cenário, similar ao primeiro acontece quando as proteções tais como: fusíveis, disjuntores estão inoperantes por alguma razão. Em decorrência uma corrente de sobrecarga, que circula nos enrolamentos do transformador acarreta o aumento da temperatura do dielétrico e a deterioração do isolamento, podendo ocasionar em seguida um arco elétrico longo, de alta intensidade. A geração de arcos no óleo mineral, produzirá bolhas constituídas principalmente de hidrogênio e etileno segundo a NEMA (1980) *National Electrical Manufacturers Association* (Associação Nacional dos Produtores Elétricos).. Uma vez que, esses gases se misturam com o ar residual que se encontra no tanque junto com óleo mineral (parte de cima), pode-se iniciar uma degradação do tanque ocasionando sua ruptura.

As fontes de ignição podem ser excesso de calor tanto dentro quanto fora do transformador. Curto-circuito de espira a espira, curto-circuito entre enrolamentos, falhas do aterramento, perda do meio de refrigeração do transformador, além de falha dos dispositivos de proteção do transformador (ou seja, dispositivos de proteção do transformador podem ser categorizado como: proteção contra curto-circuito; falha dos fusíveis; proteção contra excesso de pressão, temperatura e gás, baseados na natureza das falhas do transformador; soma-se a isto as proteções de excesso de pressão que abrangem falha do relê de pressão imediata, e capacidade inadequada ou falha para abrir a válvula de alívio de pressão.) podem resultar em geração excessiva de calor dentro do transformador.

Desta vez a abordagem se trata de um cenário de incêndios em transformadores confinados, que eventualmente produzam poças do líquido do transformador no chão. Se o líquido ou o vapor conseguir alcançar uma fonte de ignição externa (talvez uma lâmpada piloto), acontecerá um incêndio de poça. Mesmo se não houver nenhuma fonte de ignição

próxima, a perda do fluido dielétrico pode causar uma falha interna no transformador, e ocasionar a geração de arcos entre as buchas ou nas proteções que atuam no transformador.

Ainda em relação aos cenários de incêndios em transformadores pode-se afirmar que as mais prováveis localizações de vazamento de óleo resultante da falha elétrica são as buchas, tampas, terminais de alta voltagem e através das soldas do topo ou fundo do tanque. Podemos ainda citar os tubos de conexão do tanque adjacente com o tanque do transformador que poderão vazar óleo se esses sofrerem o impacto das buchas ou da tampa do tanque do transformador caso estes venham a se desprender. Vale salientar, que há ainda a possibilidade de vazamento através dos canos do radiador se esses romperem-se.

Uma vez que houve a ruptura do tanque e houve vazamento do óleo mineral e/ou gases produzidos pela decomposição do óleo, há ainda dois cenários possíveis de incêndio no caso de vazamento de óleo; primeiro, vazamento acima do nível do óleo; e segundo, vazamento abaixo do nível do óleo. No primeiro caso o óleo será ejetado, porém a maior parte do óleo continuará no transformador, possivelmente a chama não se propagará extensivamente. No segundo caso o cenário de incêndio pode ser mais severo uma vez que as aberturas estarão abaixo do nível do óleo. Em outras palavras, grande quantidade de óleo isolante pode ser derramado, sofrer ignição e se tornar um extenso incêndio de poça.

Os tipos de incêndios mais frequentes associados aos transformadores são incêndios de poça ou incêndio de “spray”. As possíveis causas destes estão mostradas na Figura 3.6. Uma falha típica, geralmente, começa com um vazamento de corrente entre as espiras, gradualmente vai envolvendo mais espiras e tornando-se uma descarga entre núcleos ou entre núcleo e terra, desprendendo repentinamente um grande pulso de energia. Se a liberação de óleo ocorrer na válvula de alívio de pressão ou nas buchas, sem ignição imediata, um chama será formada, dando origem a um incêndio de poça. Soma-se a isto o fato de que um incêndio de poça pode também ser iniciado devido a um arco intenso ou a um excesso de calor localizado nos enrolamentos.

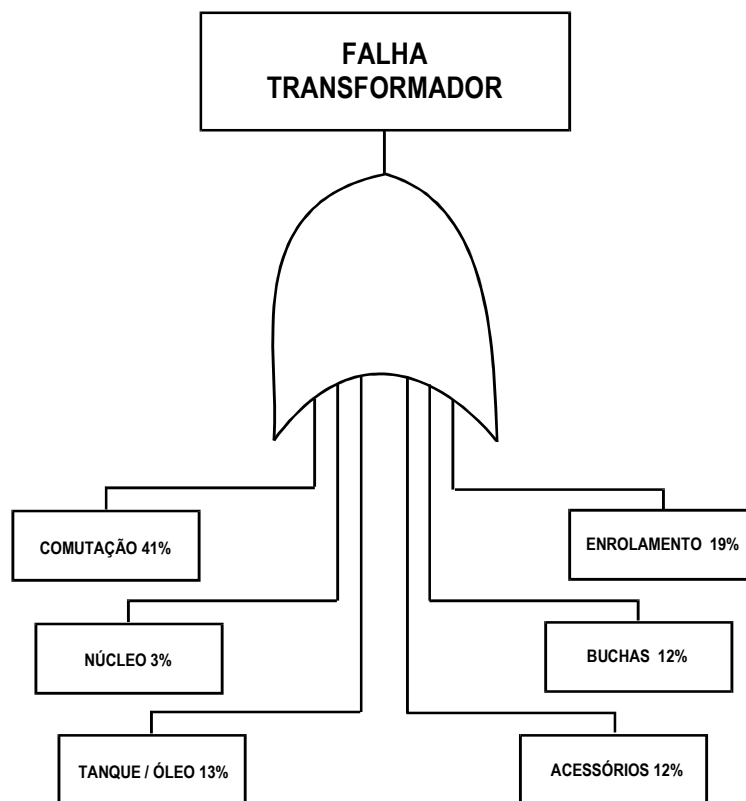


Figura 3.6 - Distribuição típica de falhas

Uma das seqüências para um possível incêndio spray pode começar a partir da liberação do óleo, para compensar o excesso de calor e pressão dentro do transformador decorrentes da falha interna ou da exposição a um incêndio externo. O material combustível liberado poderá ou não sofrer ignição de imediato. Se a ignição for imediata um incêndio em spray poderá acontecer, se a abertura para liberação do óleo for relativamente pequena e estiver localizada abaixo do nível do óleo. O que poderá ser o resultado de falha do fabricante, manuseio brusco, entre outras. Por outro lado, se a abertura para liberação do óleo for grande, como por exemplo, as decorrentes da explosão da tampa, e houver ignição imediata poderá ser formada uma bola de fogo. A Figura 3.7 nos mostra os eventos para o caso em que uma falha poderá conduzir a ruptura do tanque do transformador.

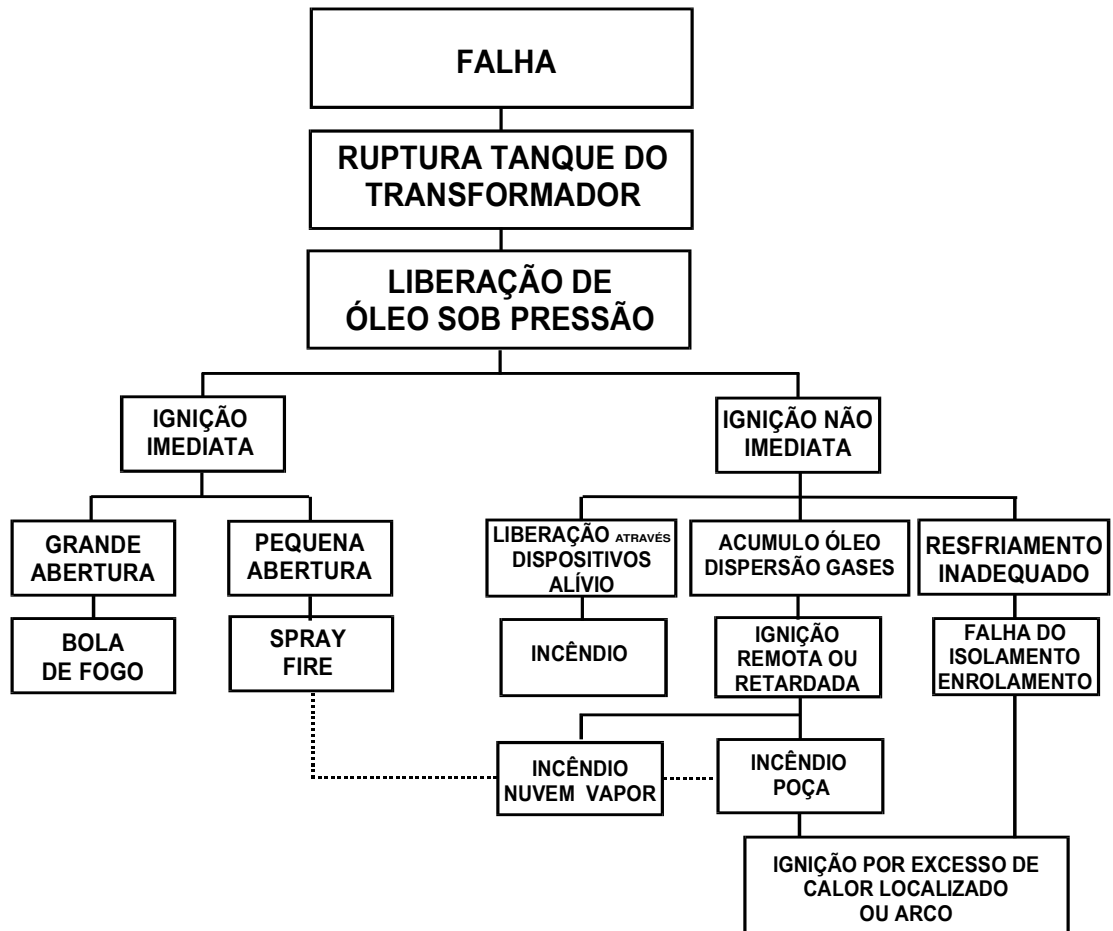


Figura 3.7 - Ruptura do tanque.

3.4 A Experiência Brasileira

O Brasil tem uma capacidade instalada de aproximadamente 94.000 MW maior do que Inglaterra e menor que a França. A maioria desta energia vêm das usinas hidrelétricas. As mesmas são responsáveis por 81,000MW. Entre nossas usinas hidrelétricas a Companhia Hidroelétrica do São Francisco é a maior companhia com uma capacidade instalada de mais de 10,000MW. A demanda brasileira é aproximadamente 60,000MW. O Brasil ao todo possui 70,000Km de linhas de transmissão de 230kV. Nossa capacidade da transformação é de mais de 171GVA, nos oito anos seguintes essa mesma capacidade aumentará em 50%. A Figura 3.8 mostra o sistema brasileiro.

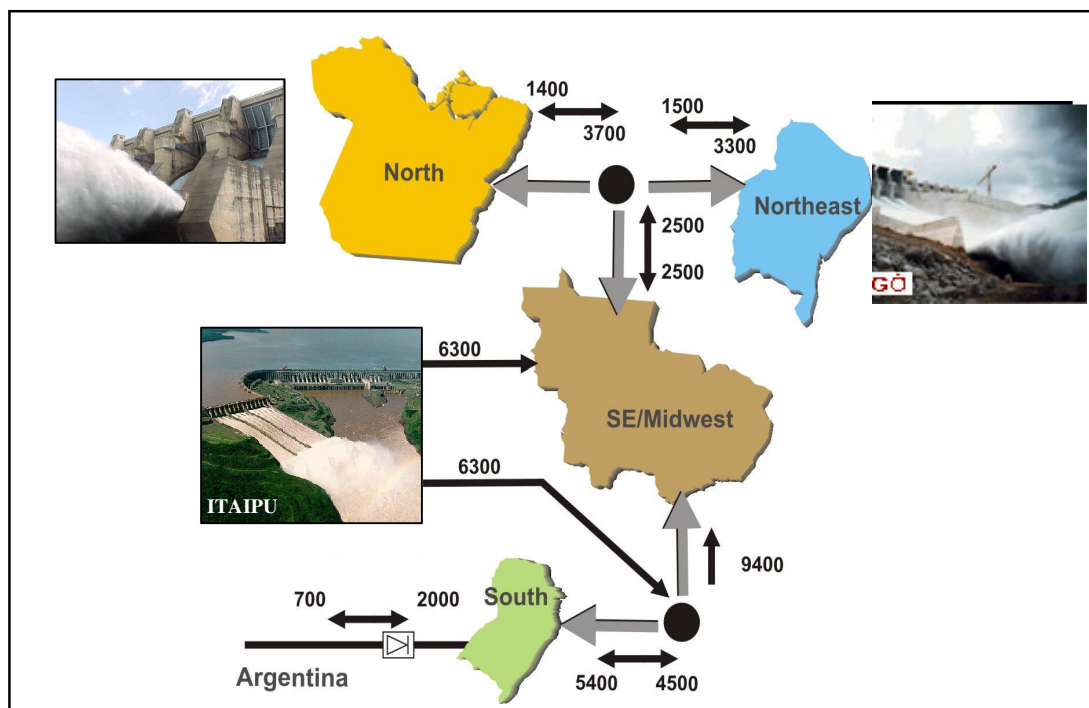


Figura 3.8 - O Sistema elétrico brasileiro. Fonte: NOS (Operador Nacional do Sistema)

Um incêndio em um transformador afeta as outras unidades da subestação devido a um mau projeto das paredes corta fogo e do dique de contenção. O dique de contenção sob o transformador deve coletar o óleo no caso de um vazamento a fim impedir a contaminação do solo. Também é importante impedir um BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour*-Vapores de líquidos que se expandem em ebulição), bem como um incêndio de poça ou em jato. Um mau projeto mecânico do reservatório do transformador pode causar o vazamento do óleo, como resultado ocorre a contaminação do óleo. A degradação do óleo pode conduzir a um incêndio no transformador. A Figura 3.9 ilustra este caso.

Um transformador em uma subestação de 500kV estava operando sob uma circunstância normal de funcionamento, quando por alguma razão o sistema do pulverizador estava ativado por um alarme falso. Isto ocorreu por que o sensor do sistema de extinção de incêndios foi colocado na bucha de alta tensão, e não no reservatório do transformador, em seguida um arco externo causou a ruptura da bucha, dando início a um incêndio.



Figura 3.9 - Vazamento do óleo mineral pelo tanque do transformador.

Em uma subestação houve incêndios em três transformadores. Somente um dos transformadores foi protegido por um sistema de pulverizador. Os dois outros não foram protegidos por este mesmo sistema. No transformador protegido o sistema do pulverizador controlou o fogo e o impacto foi minimizado, isto é o transformador pôde ser reparado. O incêndio de um dos transformadores desprotegidos ocorreu em um dia da chuva forte e o outro em um dia quente do verão (isto é, a temperatura ambiental estava em torno de 30oC). Apesar do transformador estar sem proteção, a chuva o resfriou e o mesmo pôde ser reparado. Entretanto, o outro transformador desprotegido que se incendiou no verão não pôde ser reparado, havendo a perda do mesmo.

Um autotransformador de 150MVA protegido por um sistema de pulverizador se incendiou em consequência de uma falha da bucha, Figura 3.10. O sistema do pulverizador não operou quando o incêndio iniciou. Este atraso causou a propagação do fogo, devido ao vazamento do óleo através da base da bucha.

Por outro lado, a natureza violenta de um incêndio em um transformador pode tornar o sistema automático do pulverizador inútil. Embora isto possa ter ocorrido, em alguns casos o sistema automático do pulverizador conseguiu operar mesmo após a explosão e foi a ele creditado com controle do incêndio, limitando os danos e minimizando o tempo de parada da subestação. Como o sistema em que o transformador está inserido tem um comportamento dinâmico, os cenários de incêndios estão sujeitos à incerteza.

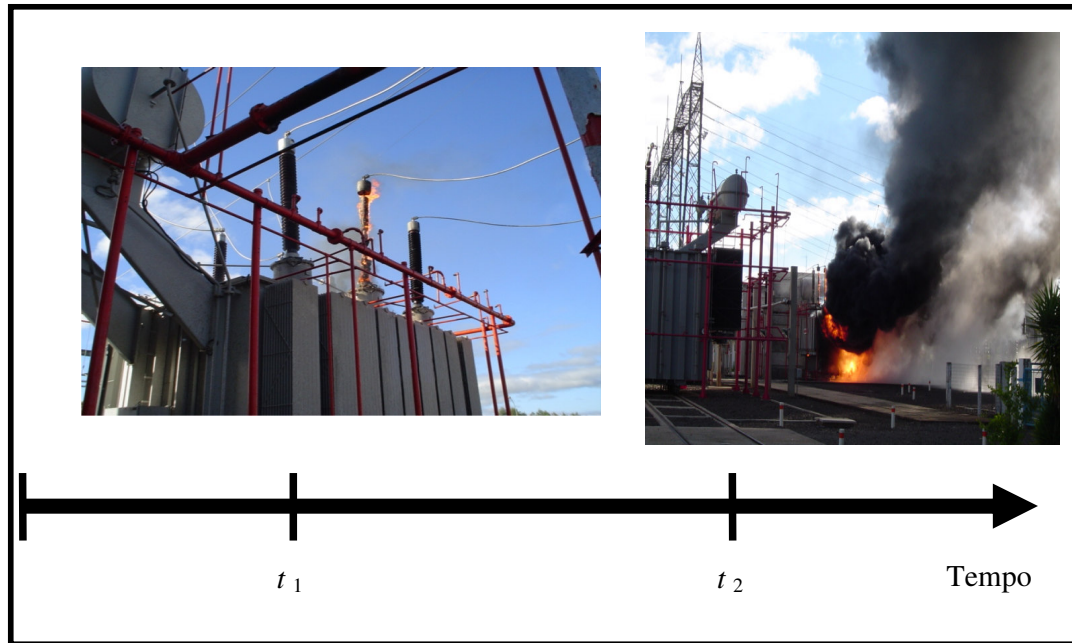


Figura 3.10 - Evolução de um incêndio em um transformador

O transformador de potência desempenha um importante papel acerca das decisões sobre o lay-out da subestação. As considerações de proteção ao incêndio envolvem: a) distância segura da separação de estruturas ou equipamentos. Embora o incêndio possa se espalhar através de uma variedade de modalidades da propagação, quando há uma separação espacial entre as estrutura expostas, a ameaça dominante a ser avaliada é radiação da flama; b) acessibilidade e confiabilidade da fonte de água; c) Capacidade e posição da supressão manual de incêndios; e d) impactos ambientais no local

A posição de um transformador numa subestação pode afetar a missão e objetivos da organização no caso da ocorrência de um incêndio. Algumas organizações ignoram o risco de incêndio na esperança que o infortúnio não lhes acontecerá. Ou baseados na suposição que se um incêndio ocorrer, a decisão do que se deve fazer ocorrerá no momento do incêndio. A Figura 3.11 mostra a posição do transformador em uma termoelétrica, neste caso se um incêndio no transformador ocorrer os produtos da combustão poderão fluir no sistema da entrada das turbinas.



Figura 3.11 - Detalhe do lay-out de uma usina.

3.5 Identificação de Cenários de Incêndios em Transformadores Através dos Diagramas Contínuos e Únicos

Uma das tarefas mais importantes em todo o programa de gerência de risco é a identificação do risco, porque é impossível atenuar um risco que não possa ser identificado, ou que não seja bem compreendido. Os riscos em potenciais podem ser atenuados em mais de uma maneira, mas a escolha da melhor técnica requer uma análise de normas de segurança, técnicas e da própria organização. Além disso, as técnicas de identificação do risco podem ser usadas para investigar causas prováveis de acidentes, na identificação do equipamento ou dos dispositivos de segurança para a manutenção, teste ou a inspeção especial. Mesmo com qualquer tipo de dificuldade, os efeitos em um período de tempo curto são notórios. Os benefícios de uma avaliação do risco é substancial. Os benefícios incluem: poucos acidentes durante o ciclo de vida do sistema, a consequência de um acidente é menor quando uma falha aconteceu, o tempo de resposta durante uma situação de emergência é menor, melhorias nos programas de treinamento e na compreensão do processo geral, um melhor atendimento às normas da legislação, e um relacionamento melhor com a comunidade.

Entretanto, estes benefícios não podem ser alcançados sem um investimento. Dependendo da complexidade do sistema, a identificação do risco pode durar horas ou meses. Por outro lado, apesar das características diferentes de cada recolhimento das técnicas de análise, ver Tabela 2.1. A escolha das técnicas de identificação do risco a ser usadas durante a estruturação e compreensão do cenário podem ser um trabalho difícil. No geral, a seleção

envolve a escolha de diversas técnicas de análise, para analisar diferentes partes do processo ou diferentes riscos associados ao sistema. A seleção das técnicas a serem usadas durante a identificação do risco depende do objetivo do programa de gerência, a severidade do risco, o quanto e como é complexo o processo ou o sistema, as informações existentes, bem como o tempo e os recursos disponíveis. Recomenda-se inicialmente um desenvolvimento qualitativo da análise, pois técnicas qualitativas apresentam uma certa facilidade de execução e não necessita de recursos adicionais. Entretanto é necessário ter em mente que as técnicas quantitativas complementam as qualitativas.

Conforme mencionado no capítulo anterior as técnicas detalhadas e estruturadas tais como HAZOP(*Hazard and Operability Study* – Estudo de Riscos e Operações) ou FMEA(*Failure Mode and Effect Analysis* - Análise do Tipo e Efeito de Falha), são recomendadas para serem usadas para o desenvolvimento da identificação do risco de sistemas complexos. Em sistemas menos complexos, deve-se empregar técnicas mais simples, tais como o what if(o que se?) além de checklists (listas de verificação). Por outro lado, em um sistema mais complexo, onde estejam presentes riscos mais severos, uma análise mais detalhada deve ser desenvolvida através do método do diagrama lógico das falhas. O segredo em selecionar a técnica de análise que melhor se adequa as exigências do problema, é o uso de técnicas simples e complemento de suas deficiências com outras técnicas, de modo que um estudo eficiente possa ser realizado. Entretanto, mesmo com a possibilidade de agregar técnicas de análise de risco, para alcançar uma análise mais exata, não deve haver garantia que todos os acidentes, causas e efeitos foram considerados. Além disso, alguma mudança no projeto ou operação e os procedimentos ou as condições de manutenção pode ter o impacto significativo na segurança contra incêndios.

Uma compreensão clara das relações e das interdependências dos eventos (isto é uma ocorrência) são de importância fundamental na compreensão do problema. É considerado surpresa que os diagramas lógicos disponíveis hoje, tais como a árvore dos eventos, árvore de falhas entre outros, não permitam a visualização da seqüência de eventos que podem conduzir a um incêndio. De acordo com Turner(1978), acidentes de grande escala, necessitam de tempo, recursos e organização, se eles estão para ocorrer. Isto significa que um desastre é um resultado de uma concatenação dos eventos com uma probabilidade baixa de ocorrer ao mesmo tempo. Turner(1978) sugere também que estes eventos não ocorrem em conseqüência dos eventos aleatórios. Conseqüentemente, os diagramas lógicos que comunicam como os

eventos podem ser conectados, (como um retrato em movimento) são fundamentais em identificar os perigos do sistema.

Uma árvore de eventos é um diagrama lógico que identifica relacionamentos seqüenciais. As árvores dos eventos descrevem o comportamento como uma seqüência de eventos discretos, conectados. Os eventos na árvore são condicionais. Cada ramo representa um estado possível do sistema. A seqüência de eventos permite a identificação do número de cenários de um único evento inicial indesejável. Entretanto, na árvore dos eventos os detalhes da avaliação não podem ser mostrados. Desse modo, uma árvore de falhas pode ser usada para avaliar os ramos da árvore dos eventos.

Uma árvore de falhas é um diagrama que identifica os eventos ocasionais, que podem conduzir a uma falha do sistema. Um evento que identifica a falha é seguido para trás, a fim de determinar suas causas. Em se tratando de proteções contra incêndios e explosões uma falha em qualquer parte do sistema pode ser o resultado do erro humano, do mau funcionamento do equipamento, de manutenção não adequada e do desempenho inadequado da característica do equipamento.

Uma das limitações da árvore de falhas é a dificuldade inerente em tratar do tempo e dos eventos que relacionam-se, ou seja, são dependentes. Entretanto, a seqüência de eventos que poderiam conduzir a um acidente é influenciada significativamente pelo tempo. A árvore dos eventos, por outro lado, pode incorporar intervalos do tempo, mas não pode mostrar o nível dos detalhes que uma árvore de falhas permite. Os atributos úteis da árvore dos eventos e das falhas podem ser combinados em um diagrama de causa e conseqüência. A árvore dos eventos, a árvore das falhas e os diagramas de causa e conseqüência são úteis em desenvolver uma compreensão de um sistema complexo e de suas relações. Entretanto, em um sistema complexo pode haver um número enorme de modalidades de falha. Obviamente, um computador é necessário para manter-se a par dos eventos e de suas relações. O custo deste nível de sofisticação é justificado somente em situações especiais.

Uma técnica adicional que incorpora algumas das características úteis da árvore dos eventos e da árvore das falhas, assim como o diagrama causa conseqüência, fornecendo também a flexibilidade adicional de analisar as necessidades específicas são as redes lógicas. Estes diagramas de rede são uma estrutura semi-gráfica que é usada para descrever um processo do pensamento, focalizar a atenção na situação que está sendo avaliada, e ajudar a comunicação com os outros. Dois tipos diferentes de estruturas de rede são usados. O primeiro tipo, conhecido como o diagrama contínuo é análogo ao retrato em movimento. Ou

seja, o diagrama contínuo ajuda-nos a construir e avaliar todos os cenários possíveis. Um diagrama contínuo começa com um evento específico e identifica o fluxo de eventos fornecendo uma sequência do retrato em movimento dos resultados. O tempo e a condicionalidade podem ser incorporados neste diagrama contínuo se desejados. O processo usa o raciocínio indutivo a fim de identificar e arranjar em seqüência lógica os eventos.

O segundo tipo de diagrama, chamado de diagrama único, é análogo a um único evento do retrato em movimento. O diagrama único pode parar a variável tempo e examinar, em detalhe, o desempenho de partes diferentes do sistema no cenário em questão. Esta análise fornece uma idéia relativamente desobstruída de o que está acontecendo naquele imediato instante de tempo. Uma boa compreensão do diagrama único se dá selecionando apenas alguns eventos, para um estudo detalhado, a fim de desenvolver uma boa compreensão de como o sistema considerará o cenário de falha. O processo usa um raciocínio dedutivo de identificação de uma integração lógica da sequência que afeta o resultado do evento.

O diagrama contínuo permite focalizar a seqüência de eventos que estão sendo considerados. Identificam a condicionalidade dos eventos e podem incorporar o tempo no processo. O diagrama único permite que a variável tempo pare e este instante de tempo ou evento desejado sejam avaliados, assim com suas causas ou condições nesse instante de tempo específico. Estes dois diagramas lógicos se coordenados podem descrever o caminho da falha, bem como, avaliam os detalhes em falhas críticas selecionadas. De forma a dar sentido ao que foi exposto anteriormente, principalmente, em se tratando do que pode dar errado e como pode dar errado, imagina-se um incêndio em um transformador de potência.

Admitindo que uma câmera pode registrar as ações do incêndio, do processo, das atividades humana e outras variáveis que são associadas ao incêndio. Este registro inicialmente nos evidenciaria um grande número de fatos que ocorreriam simultaneamente. Admitindo também que a câmera possui filtros que rejeitam toda a informação exceto aquele que influenciará uma falha particular.

O diagrama contínuo segue o processo de pensamento de como uma seqüência de eventos poderia afetar o desempenho do sistema. Para ilustrar este conceito considere que alguma falha na bucha de alta tensão poderia resultar no incêndio do transformador, Figura 3.10. Algumas causas da falha da bucha são representadas em detalhe na Figura 3.12. A Figura 3.13 mostra um diagrama contínuo, que descreva o processo do pensamento para construir um cenário de incêndio no transformador devido a uma falha específica da bucha.

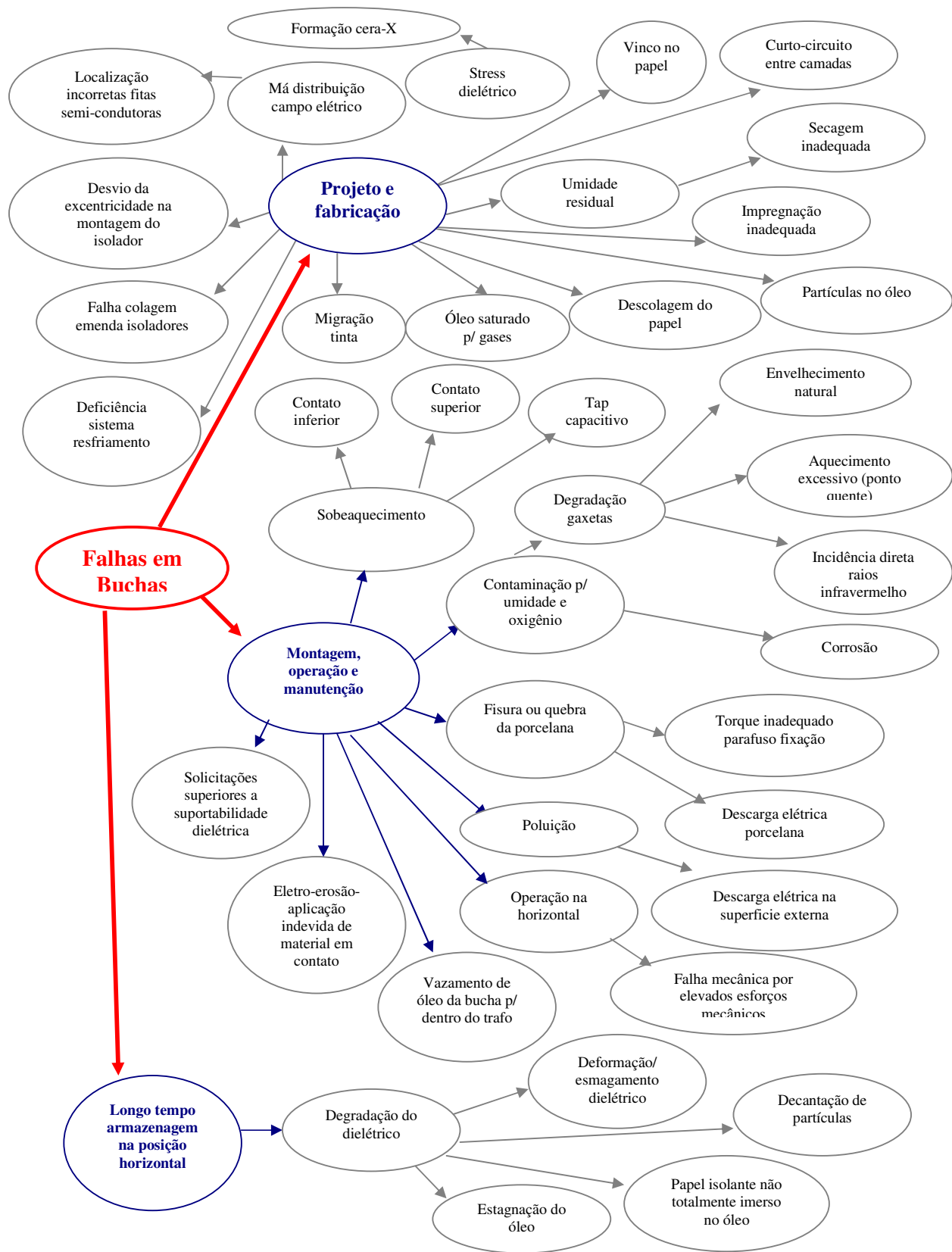


Figura 3.12 –Causas de falhas em buchas.

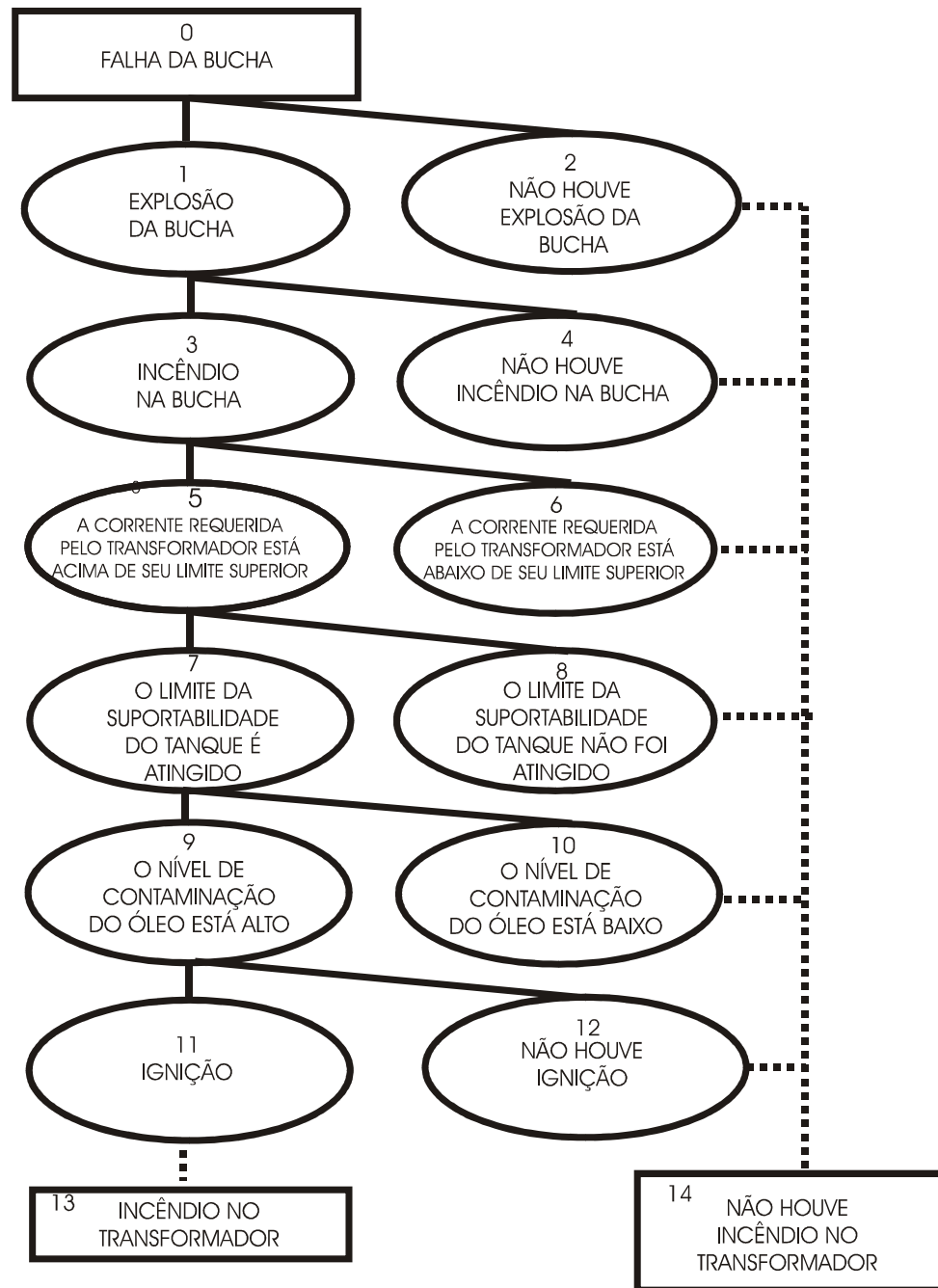


Figura 3.13 –Diagrama Continuo

O cenário representado pelo trajeto 0-1-3-5-7-9-11-13 mostra que um incêndio no transformador poderia ser o resultado da seqüência do evento seguir: após a falha da bucha, a mesma explode e se inflama, a corrente requerida pelo transformador é acima do seu limite superior, o reservatório principal não suporta a pressão interna, o nível da contaminação do óleo está acima do limite superior e uma fonte de ignição está presente.

O cenário representado pelo trajeto 0-2 mostra que um incêndio no transformador não ocorrerá se a bucha não explodir depois que falha.

O cenário representado pelo trajeto 0-1-4 mostra que mesmo após a falha da explosão da bucha, o incêndio no transformador não acontecerá se a explosão da bucha não iniciar um incêndio.

O cenário representado pelo trajeto 0-1-3-6 mostra que em consequência de uma falha da bucha a mesma poderia explodir seguida por um incêndio, mas se a corrente requerida pelo transformador for abaixo do seu limite superior, o incêndio no transformador não ocorrerá.

O cenário representado pelo trajeto 0-1-3-5-8 mostra que em consequência da falha da bucha a mesma poderia explodir seguida por um incêndio, mesmo que a corrente requerida pelo transformador seja acima do seu limite superior, mas como a suportabilidade à pressão do tanque não foi afetada, o incêndio no transformador não ocorrerá.

O cenário representado pelo trajeto 0-1-3-5-7-10 indica que um incêndio no transformador poderia ser evitado se o nível de contaminação do óleo estiver abaixo do seu limite, mesmo que a bucha venha a falhar, que ocorra a explosão e que a mesma se inflame e mesmo que a corrente requerida pelo transformador esteja acima do seu limite superior ou haja falha no tanque.

O cenário representado pelo trajeto 0-1-3-5-7-9-10 indica que o incêndio no transformador não acontecerá se não houver nenhuma fonte de ignição presente, mesmo se a bucha falhar, explodir e inflamar, mesmo que a corrente requerida pelo transformador esteja acima do seu limite superior, e mesmo que o nível de contaminação do óleo esteja também acima de seu limite superior.

Quando o diagrama contínuo focalizar na seqüência dos eventos, um único diagrama é capaz de parar o cenário e analisar as condições naquele instante de tempo. Significa que o mesmo representa uma única célula do diagrama contínuo. A estrutura do diagrama único é análoga a do diagrama contínuo. A Figura 3.14 registra o instante de tempo do sucesso ou da falha do reservatório do transformador. A intenção é compreender porque o reservatório não suportará a pressão interna em consequência de uma falha da bucha.

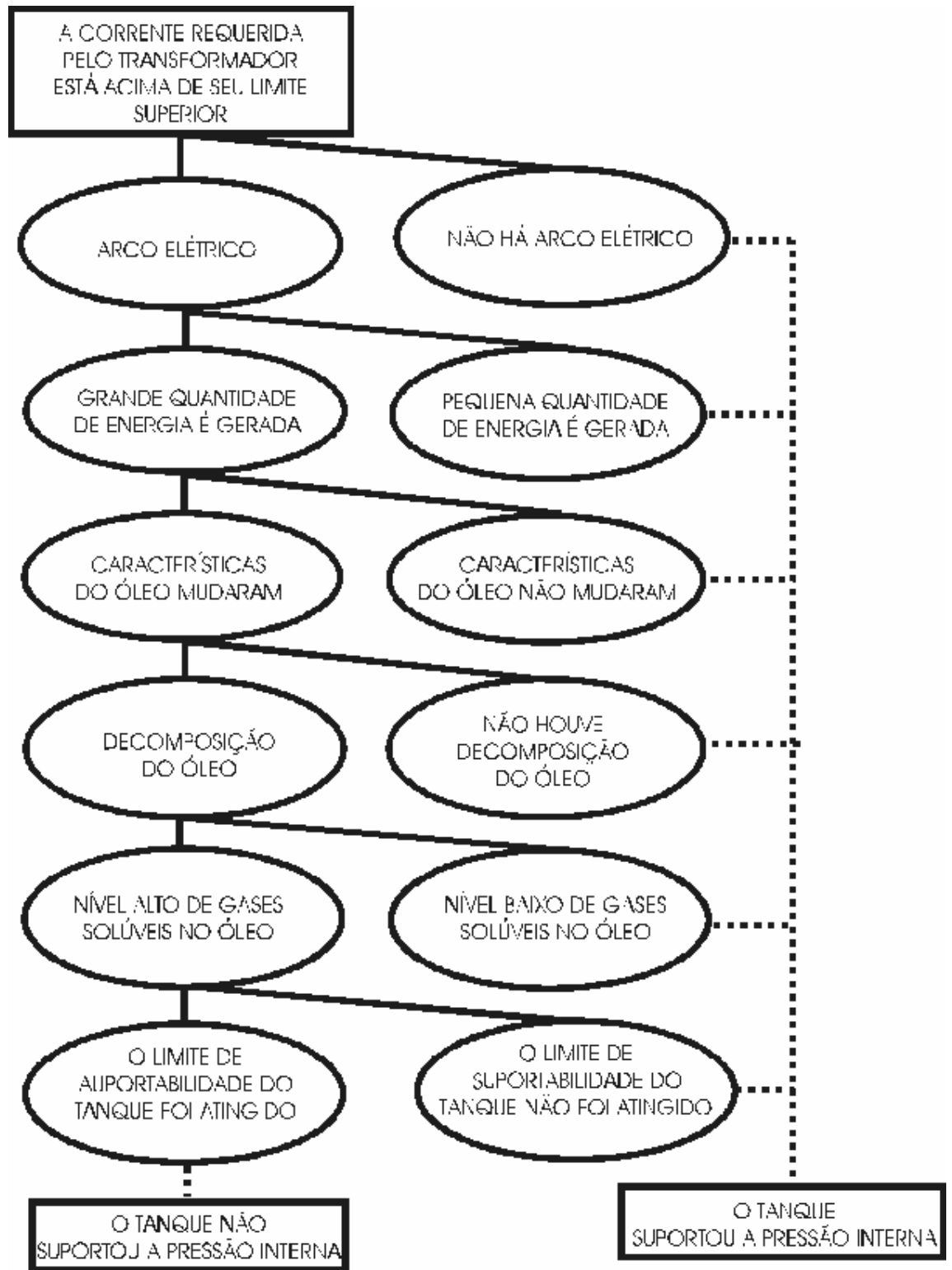


Figura 3.14 - Diagrama contínuo de um cenário de incêndio levando em consideração o limite da suportabilidade do tanque.

Um outro efeito indesejável que deve ser considerado, o qual está associado a incêndios, explosões e projeção de fragmentos é o “efeito dominó”. É possível sob determinadas circunstâncias que a causa de um incêndio no transformador seja uma falha da bucha, e que o incêndio esteja atingindo outros transformadores ou equipamentos do subestação, criando um incêndio de grande porte gerando conseqüências de grande proporções. A atenção deve ser dada não somente à integridade das pessoas, mas também à resistência do outro equipamento a determinado nível da radiação. A Figura 3.15 mostra um diagrama contínuo de um cenário possível do incêndio que envolveu todos os transformadores da subestação.

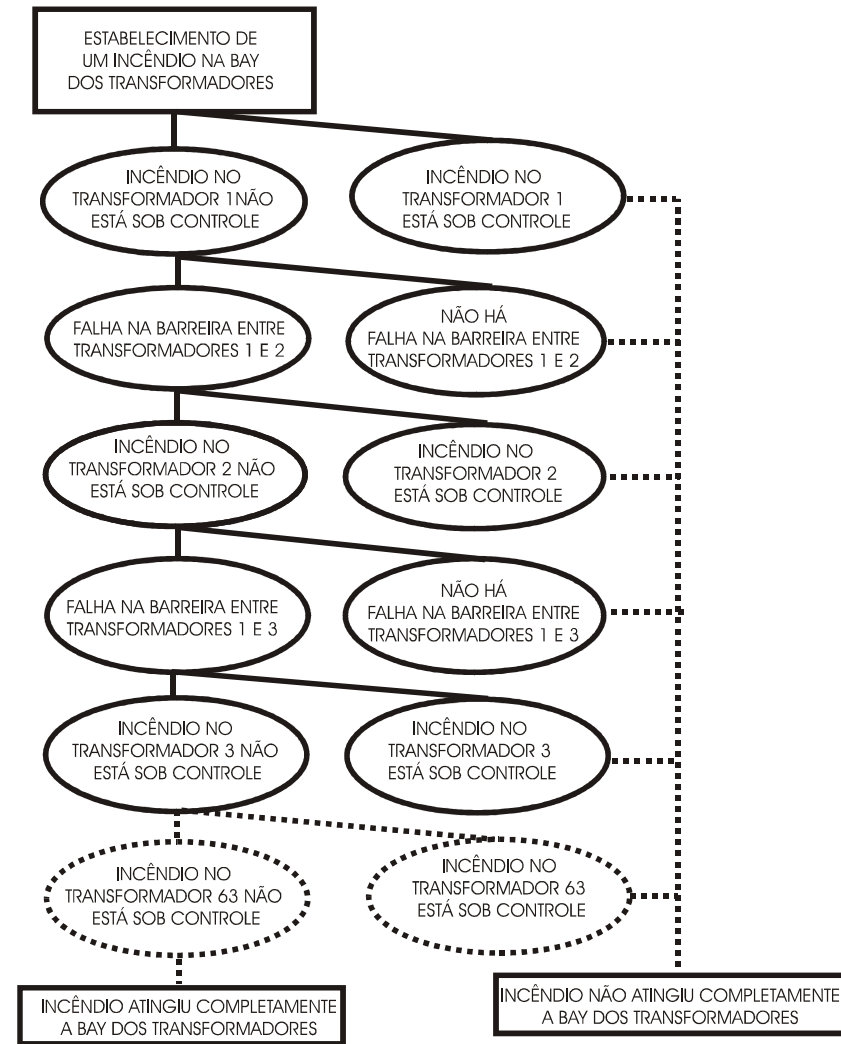


Figura 3.15 –Diagrama Contínuo de um possível cenário de incêndio numa bay de transformadores

A seguir está a Figura 3.16 e ela mostra o diagrama contínuo de um cenário de incêndio, este cenário foi proposto na seção 3.3.

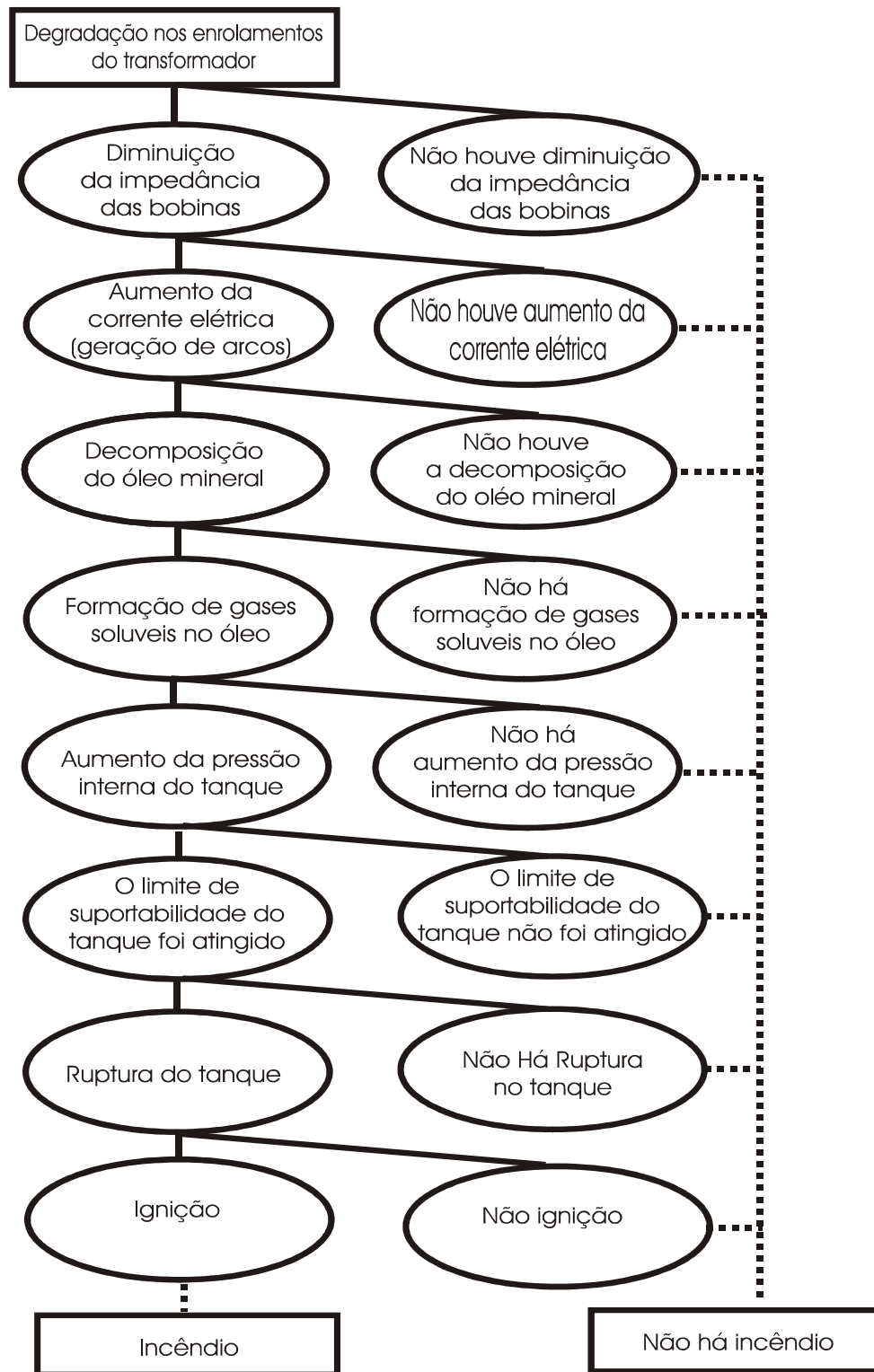


Figura 3.16- Diagrama contínuo de um cenário de incêndio, mencionado na seção 3.3.

4 MODELO DE INCÊNDIO DE POÇA EM TRANSFORMADORES

4.1 Descrição do Modelo

Uma das conseqüências diretas ou impactos mais sérios e que causam mais repercussão em um incêndio em um transformador de potência, é o efeito da intensidade da radiação térmica sobre pessoas e estruturas. O presente capítulo tem como objetivo quantificar tais impactos.

O tipo de incêndio em que foi baseado o modelo, é o incêndio de poça discutido anteriormente no capítulo anterior.

Um incêndio de poça ocorre quando um vazamento de um líquido forma uma poça, a qual sofre ignição. A energia térmica proveniente da ignição de um vazamento de hidrocarbonetos depende de vários parâmetros, os quais incluem: a) *composição do hidrocarboneto*; b) *tamanho, forma e duração do incêndio*; c) *distância entre o incêndio e o alvo*, e d) *das características do alvo*.

Em outras palavras, a caracterização de um incêndio de poça envolve a caracterização da geometria do incêndio, caracterização do incêndio e a estimativa da energia liberada pela chama. A caracterização da geometria do incêndio abrange a determinação da velocidade de propagação da chama no líquido e das dimensões física do incêndio (tais como altura, diâmetro e inclinação da chama).

É assumido que a chama é um cilindro sólido e inclinado devido a ação do vento que se comporta como um corpo cinza. A intensidade de radiação emitida pelo incêndio depende do tipo de combustível, temperatura da chama, entre outros. A energia térmica de um incêndio de poça pode ser estimada através da equação 4.1.

$$q = q_{condução} + q_{convecção} + q_{radiação} \quad \text{Equação 4.1}$$

A transferência de calor por condução decresce linearmente com o aumento do diâmetro da poça, logo a sua contribuição em grandes incêndios de poça é insignificante. O segundo termo da equação 4.1 representa o calor transferido por convecção, tendo um valor mínimo para poça de 10 cm. As chamas de dimensões similares são instáveis, efeito que desaparece para incêndios de diâmetro maiores. Para a maioria dos combustíveis líquidos a taxa de transferência de calor por radiação e a velocidade da chama aumentam com o

diâmetro da poça. Ou melhor, para poças com diâmetro maior do que 1 metro a radiação é o modo de transferência de calor dominante.

A Figura 4.1 ilustra as três maneiras que a energia térmica proveniente de uma fonte calor (neste caso um incêndio em um transformador) e transferida.

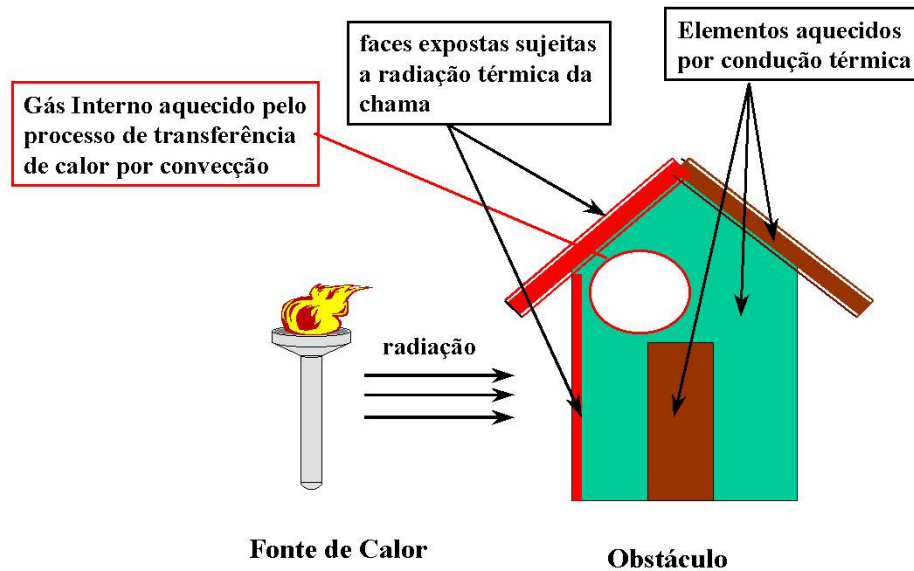


Figura 4.1 – Esquema de transferencia de calor.

A velocidade de propagação da chama, y'' , será obtida dividindo-se o fluxo de calor irradiado da chama para o líquido, pelo calor de vaporização do líquido, equação 4.2. A taxa mássica de queima (m'') (vide equação 4.6) é determinada multiplicando a velocidade de queima pela densidade do líquido. Vale ressaltar que para este modelo são válidos apenas a seguinte faixa de valores para o diâmetro da poça: $0,2m \leq D \leq 5m$, onde D é o diâmetro da poça, segundo Babrauskas(1986). De acordo com Babrauskas (1986) :

$$y'' = y_{\infty} (1 - e^{-k \cdot D}) \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde,

- y'' : é a velocidade de queima em m/s
- y_{∞} : é a velocidade de queima para um incêndio de poça com diâmetro infinito em m/s
- k : é o coeficiente de absorção em m^{-1}
- D : é o diâmetro da poça em m

No caso de um incêndio de poça o líquido irá se espalhar no piso ou solo aumentando a velocidade de propagação da chama até que a taxa de queima seja igual a vazão

volumétrica. Dentro desse contexto, de acordo com Raj(1981) o diâmetro máximo da poça e o tempo para que o estado de equilíbrio seja alcançado são fornecidos pelas equações 4.3 e 4.4. A equação 4.3 assume que a velocidade da chama é constante. Essa hipótese é válida para todos os hidrocarbonetos com a temperatura de ebulição acima da temperatura ambiente.

$$D_{eq} = 2 \left(\frac{V_l}{\pi \cdot y''} \right)^{1/2} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde,

D_{eq} : é o diâmetro da poça no estado de equilíbrio em m

V_l : é a vazão volumétrica em m³/s

y'' : é a velocidade de queima em m/s

$$t_{eq} = (0,564 D_{eq}) / (g \cdot y'' D_{eq})^{1/3} \quad \text{Equação 4.4}$$

onde,

D_{eq} : é o diâmetro da poça no estado de equilíbrio em m

g : é a aceleração da gravidade m/s²

y'' : é a velocidade de queima em m/s

A altura da chama levando-se em consideração a velocidade do vento é obtida através da equação 4.5, proposta por Thomas(2001). A velocidade adimensional do vento é fornecida pela equação 4.6, Zalosh(2003). A inclinação da chama com a vertical é estimada pela equação 4.7, Zalosh (2003).

$$\frac{H}{D} = 55 \left(\frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{gD}} \right)^{0,67} \cdot u^{*-0,21} \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde,

H : é a altura visível da chama em m

m'' : é taxa mássica de queima em kg/m²s

ρ_a : é a densidade do ar ambiente em kg/m³

g : é a aceleração da gravidade m/s²

D : é o diâmetro da poça em m

u^* : é a velocidade adimensional do ventos fornecida pela equação 5.6

$$u^* = \frac{u_w}{\left(\frac{g \cdot m'' \cdot D}{\rho_v} \right)^{1/3}} \quad \text{Equação 4.6}$$

onde,

u^* : é a velocidade adimensional do ventos

u_w : é a velocidade do vento em m/s.

- g : é a aceleração da gravidade em m/s^2
- m'' : é a taxa mássica de queima em kg/m^2s
- D : é o diâmetro da poça em m
- ρ_v : é a densidade do combustível em kg/m^3

$$\cos \Theta = 0,7 \left[\frac{u_w}{\left(\frac{g \cdot m'' \cdot D}{\rho_a} \right)} \right]^{-0,49} \quad \text{Equação 4.7}$$

O diâmetro da poça sofrerá uma forte influência da velocidade do vento. Logo, o diâmetro da chama na base será alongado, enquanto na sua parte superior permanecerá inalterada, Figura 4.2. Esse aumento do diâmetro da base da chama (D') será estimado através da equação 4.8, de acordo com Mudan e Croce(1995).

$$\frac{D'}{D} = 1,25 \left(\frac{u_w^2}{g \cdot D} \right)^{0,069} \left(\frac{\rho_v}{\rho_a} \right)^{0,48} \quad \text{Equação 4.8}$$

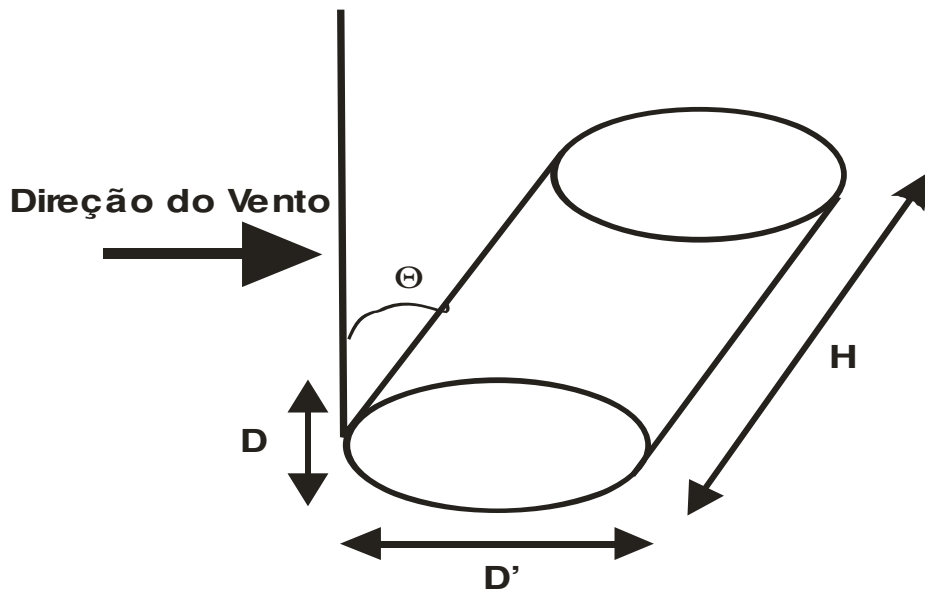


Figura 4.2 – Parâmetros geométricos de um incêndio de poça.

A equação geral para a energia liberada por um incêndio de poça é calculada pela equação 4.9, Zalosh(2003), a qual assume que a energia é proporcional a eficiência do processo de queima (combustão). A energia da chama no alvo é estimada por Zalosh (2003) pela equação 4.10, que considera a chama como uma fonte térmica. Uma das limitações da equação 4.10, é que a energia térmica em alvos muito próximo da chama é superestimada. Por outro lado, a radiação térmica para alvos a partir certa distância da chama são estimados com uma precisão, pois os efeitos da geometria da chama são insignificantes.

$$Q = \frac{m'' \cdot \Delta H_c \cdot \eta \cdot \pi \cdot D^2}{4} \quad \text{Equação 4.9}$$

Onde,

- Q : é o calor liberado pela chama em kW
- m'' : é taxa mássica de queima em $\text{kg/m}^2\text{s}$
- ΔH_c : é o calor de combustão em kJ/kg
- η : é a eficiência do processo de combustão
- D : é o diâmetro da poça em m

$$q_r'' = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot x^2} \quad \text{Equação 4.10}$$

onde

- q_r'' : é a energia incidente no alvo em kW/m^2
- Q : é o calor liberado pela chama em kW
- x : é a distância do alvo a chama em m

Segundo Zalosh (2003), deve-se considerar alvos cuja distância à chama seja no mínimo $x=2H$, pois para valores menores obtêm-se valores superestimados para a energia incidente no alvo.

4.2 Resultados do Modelo

Levando em consideração o exposto na seção anterior, sobretudo as equações de 4.1 a 4.10, e as características do óleo usado nos transformadores, concluímos que a intensidade da radiação emitida pela chama, no caso de um incêndio de poça em transformador, é uma função deste diâmetro. Como era esperado a intensidade da radiação térmica cresce com o aumento do diâmetro da poça ver Figura 4.3. Vale lembrar que de acordo com Babrauskas (1986) o modelo é válido para: $0,2(\text{m}) \leq D \leq 5(\text{m})$, onde D é o diâmetro da poça. Todos os valores calculados estarão presentes também no Apêndice 1.

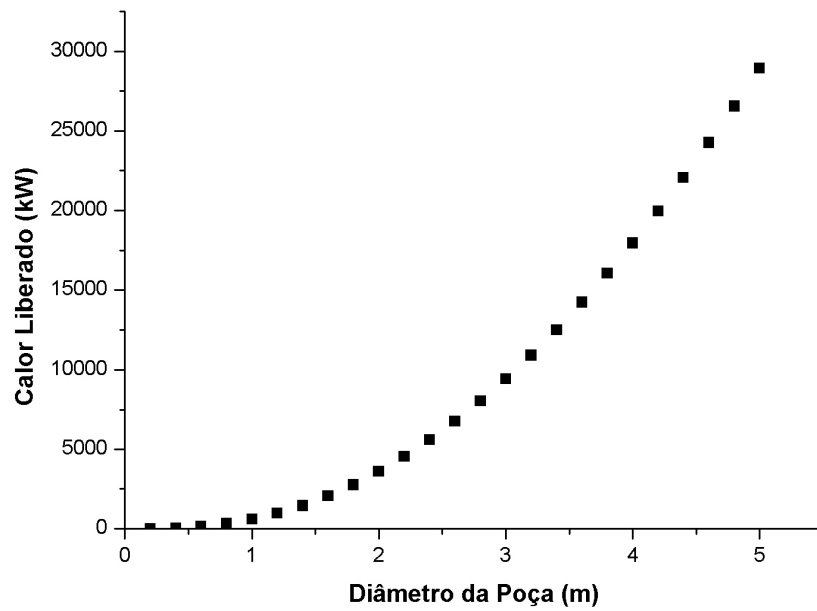


Figura 4.3 - Calor liberado em kW em função do diâmetro da poça(m).

A energia incidente no alvo relaciona o calor liberado pela chama de um incêndio de poça de diâmetro D a um ponto específico no espaço. A Figura 4.4 apresenta o comportamento da energia incidente para alvos que variam de 0 a 25 metros de distância da chama, e para diâmetros de poça que variam de 0,2 a 5 metros, como era esperado a energia incidente no alvo decresce com a distância da chama ao alvo.

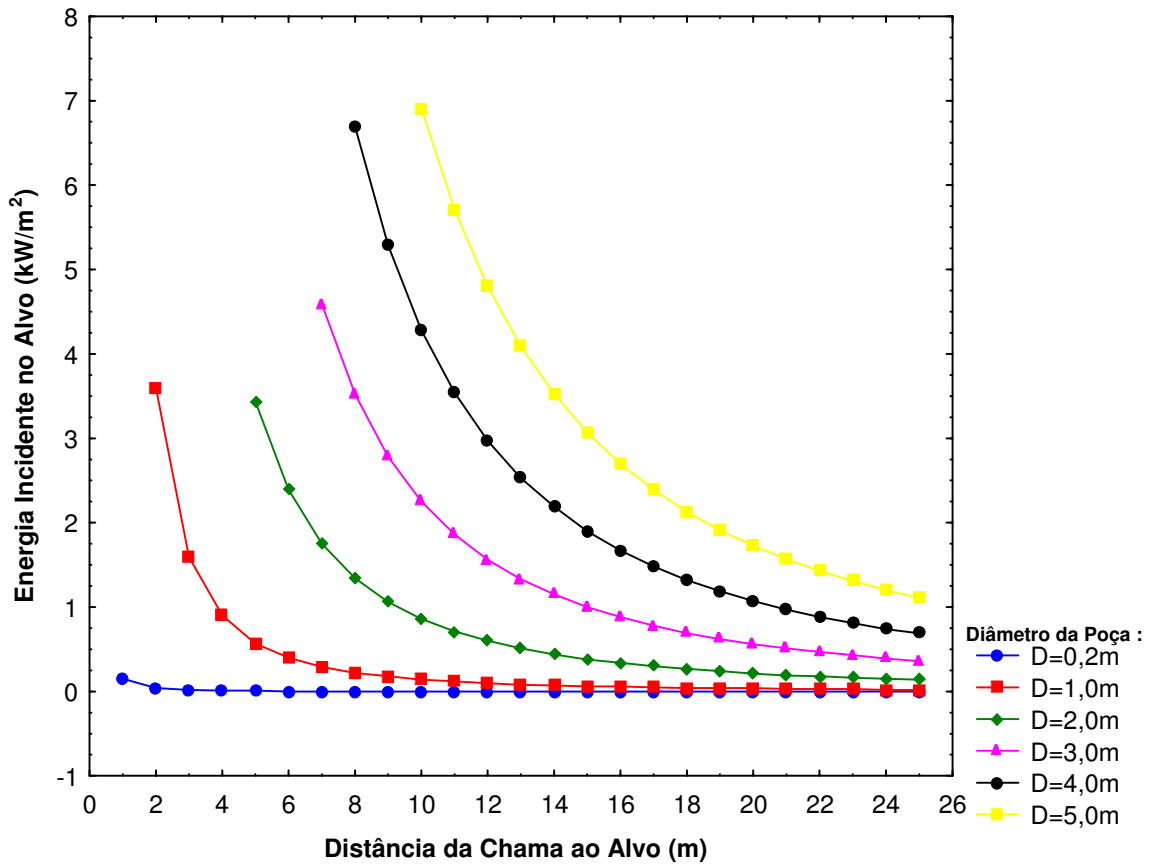


Figura 4.4 - Curvas da energia incidente no alvo em função da distância do mesmo à chama.

A seguir será apresentado alguns resultados relativos aos parâmetros geométricos da chama, tais como: altura e inclinação. Todos esses parâmetros sofrem bastante influência da velocidade dos ventos e por isso esta variável será analisada simultaneamente com os parâmetros supracitados. A Figura 4.5 mostra o valor do ângulo de inclinação com a velocidade dos ventos, observa-se que quanto maior a velocidade dos ventos maior será a inclinação do cilindro de chama, ver também a Figura 4.2.

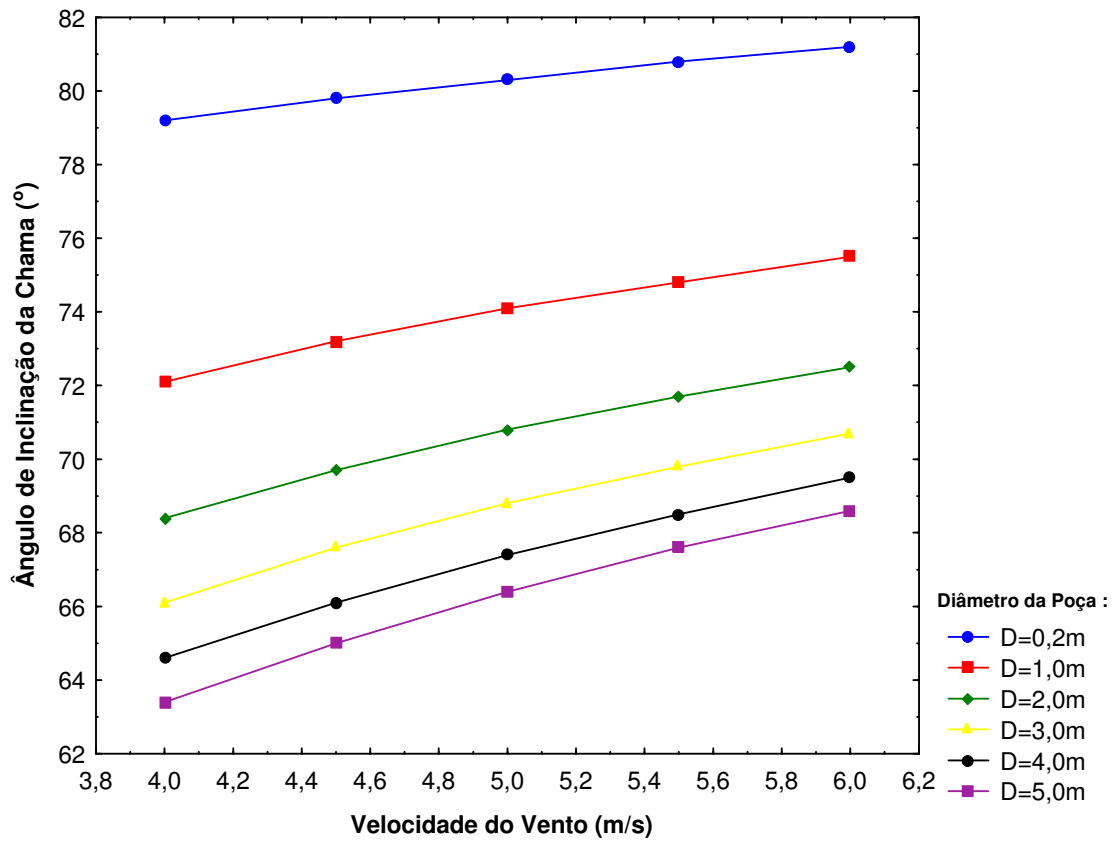


Figura 4.5 – Inclinação da chama devido a velocidade dos ventos.

Por fim a comportamento da altura do incêndio em relação à velocidade dos ventos é mostrado na Figura 4.6, como também era esperado a altura do cilindro de chama decresce com o aumento da velocidade dos ventos.

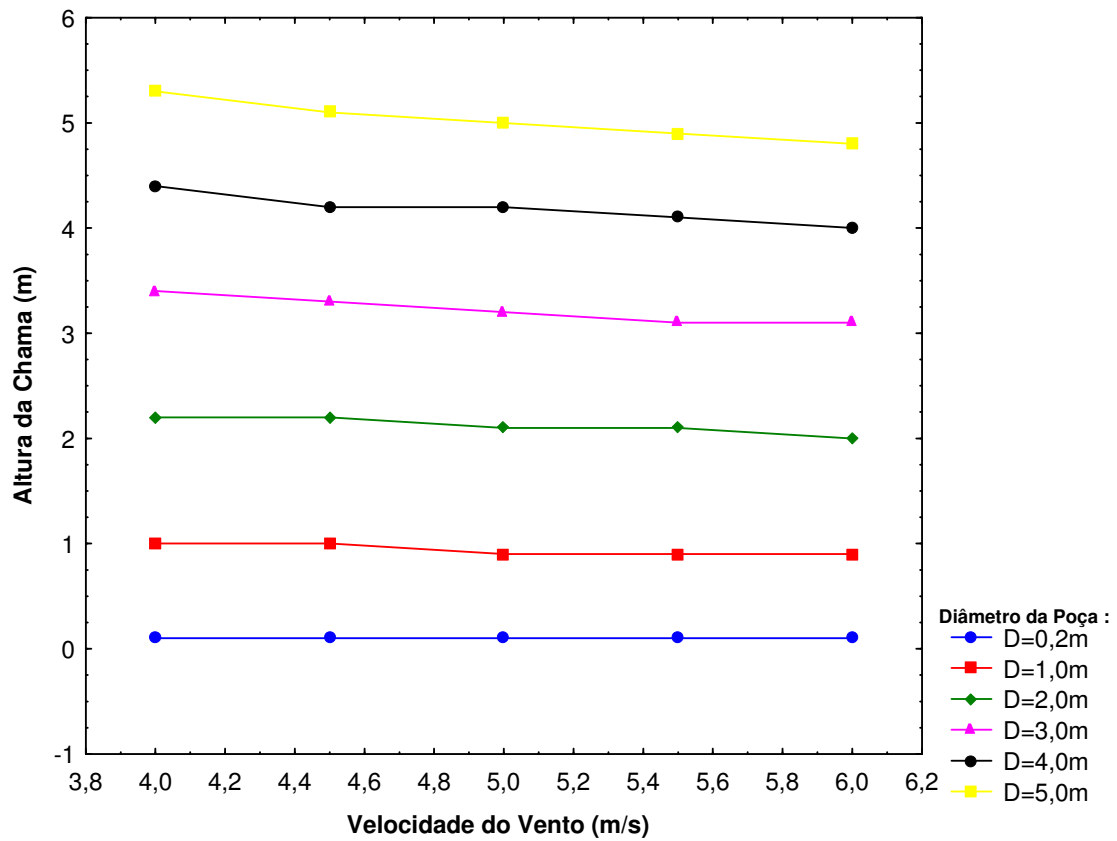


Figura 4.6 – Relação da altura da chama com o diâmetro de poça e a velocidade dos ventos

Os resultados do modelo apresentados neste capítulo serão de grande utilidade tanto no impacto da radiação térmica em pessoas e estruturas próximas ao incêndio.

5 CONSEQUÊNCIAS DE UM INCÊNDIO EM UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

5.1 Introdução

Um incêndio em um transformador de potência pode acarretar conseqüências ou impactos em pessoas, propriedades, equipamentos e estruturas, meio ambiente, além do impactos de ordem financeira.

5.2 Impactos Indiretos

5.2.1 Impacto ao Meio Ambiente

Transformadores de potência eventualmente provocam vazamentos do óleo mineral utilizado como dielétrico. As principais causas relativas ao vazamento se devem a problemas de estanqueidade e de um mau projeto do tanque do transformador.

Aliado aos problemas do tanque do transformador, se o mesmo não for protegido com diques de contenção, ou se o dimensionamento dessas bacias de contenção não for realizado de forma a reter toda quantidade de dielétrico que venha a vazar (ver capítulo 2), o vazamento do óleo mineral contaminará o lençol freático.

Para se ter uma idéia Um transformador de 100MVA possui aproximadamente 40.000 litros de óleo. Mesmo após a extinção do incêndio no transformador o óleo derramado será responsável por danos ambientais, 1l de óleo poderá contaminar aproximadamente 1.000l de água do lençol freático.

Logo, é necessário a adoção de medidas que evitem o derramamento de óleo, tais como os diques de contenção.

Outros impactos ao meio ambiente ocasionado por transformadores de potência se devem a poluição do ar, devido a grande quantidade de fumaça gerada dependendo das extensões do incêndio, além da espuma química ejetada por sistemas de proteção do tipo spray.

5.2.2 Imagem da Organização

No Brasil antes de década de 90 apenas o governo investia no setor elétrico. Mesmo com a crescente demanda ao longo dos anos as organizações públicas do setor elétrico não

investiram em equipamentos e tecnologia, como resultado a maioria dos transformadores em uso encontram-se em estado avançado em idade de operação. Como o governo a alguns anos decidiu abrir o mercado para as chamadas empresas de capital aberto, as mesmas como qualquer organização privada sofrem o risco de não atenderem seus clientes de forma satisfatória, dado que um incêndio em um transformador venha a prejudicar o fornecimento de energia elétrica a clientes seja do setor industrial ou de comércio e serviços, a reputação da organização estará comprometida com o mercado consumidor nacional.

5.3 Impactos Devido a Indisponibilidade

A ocorrência de um incêndio em um transformador de potência pode causar a interrupção do fornecimento de energia elétrica (ver Tabela 3.1). A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) foi criada pelo governo com o fim de regulamentar o setor elétrico brasileiro, esta agência ao longo de sua história vêm enfatizando que as organizações do setor elétrico incluindo usinas geradoras de energia, subestações e sistemas de transmissão e distribuição, serão punidas com onerosas multas sempre que as mesmas não forem capazes de fornecer energia elétrica a seus consumidores. A ANEEL também punirá a organização por equipamento que estiver indisponível por alguma razão.

Para usinas geradoras de energia o impacto da indisponibilidade ainda é pior pois as mesmas além de deixarem de vender energia aos seus clientes, sofrerão as multas mencionadas no parágrafo anterior afetando assim a economia de lucros de qualquer organização.

5.4 Impactos Diretos

5.4.1 Impactos aos Seres Humanos

O impacto proveniente de um incêndio em um transformador de potência em seres humanos, sendo eles técnicos, engenheiros, funcionários da organização ou até pessoas que por ventura estejam próximas a um incêndio em um transformador é a intensidade da energia térmica liberada por um incêndio.

No acesso ao risco é necessário saber qual é a energia térmica por radiação que é capaz de causar danos as pessoas. Há alguns trabalhos experimentais Clancey(1972) nesta

área realizados em animais e seres humanos. Com relação ao homem estes consideram um limite baixo para a dor e pequenos ferimentos.

Levando em consideração que: a) a nossa pele suporta uma temperatura de aproximadamente 44°C sem dor e b) em caso de um incêndio, em geral, o tempo de resposta de pessoa é cerca de 5 segundos. As Tabelas 5.1 e 5.2 e Figura 5.1 mostram os limites da dor em função da energia térmica de radiação disponível na literatura em função do tempo de exposição.

Tabela 5.1 - Intensidade da radiação térmica em função do tempo

INTENSIDADE KW/m²	TEMPO EXPOSIÇÃO Segundos
1,74	60
2,33 – 2,90	40 – 30
3,7	20
4,2 – 4,73	16 – 13,5
5,2	10,1
6,3 – 6,94	9 – 7,8
8,4	5,5
9,46	6,0
9,7	5,0
11,67	4,0
12,6	2,9
16,8	2,2
18 – 19,87	2,0

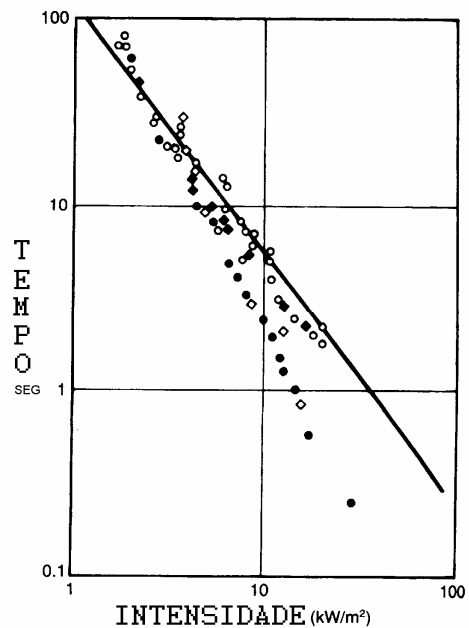


Figura 5.1 - Intensidade da radiação térmica em função do tempo.

Tabela 5.2 - Limites da dor provenientes da intensidade da radiação térmica.

INTENSIDADE KW/m²	EFEITOS
1,5	Limite da dor.
2,1	Limite da dor após 1 minuto.
1	Tolerado apenas por um homem vestido.
8	Causará a mortes após alguns minutos.
4,7	Limite da dor após 14.5 segundos.

Através da quantificação da energia liberada e da energia incidente no alvo calculadas no modelo proposto no Capítulo anterior, algumas simulações a respeito do tempo necessário para a ocorrência de fatalidades em seres humanos foram simuladas e estão apresentadas no Apêndice 2. A partir dessas simulações pode-se observar que quanto maior for o diâmetro da poça, mais rapidamente ocorrerão danos à integridade físicas das pessoas que porventura estejam nas proximidades do incêndio.

5.4.2 Impactos em Equipamentos e Estruturas

Da mesma forma que a radiação térmica proveniente de um incêndio em um transformador de potência afeta os seres humanos, é necessário o entendimento sobre como estruturas e equipamentos reagem à essa exposição.

Os valores relacionados na Tabela 5.3 indicam a máxima energia de radiação suportada por alguns tipos de estruturas:.

Tabela 5.3 - Limites da intensidade máxima suportada por algumas estruturas

ESTRUTURAS OU ÁREAS	INTENSIDADE KW/m²
Madeira, após uma exposição prolongada, ignição espontânea.	29
Compensado de madeira, após 5 segundos, ignição espontânea.	52
Superfície de um tanque, não protegido pela distância mínima (1).	8

(1) Leva em consideração incêndios de poça ou “spray fires”.

Sabe-se que a não utilização ou um mau emprego de proteções ativas e passivas contra incêndios em transformadores (ver Capítulo 2) aliado a um lay-out mau projetado de subestações, entre outros tipos de sistemas que utilizam transformadores de potência, é um fator determinante para que um incêndio em um transformador comprometa estruturas e equipamentos expostos à radiação térmica.

No Apêndice 3 encontra-se uma simulação de um incêndio hipotético em um transformador de potência, e como o mesmo expôs equipamentos adjacentes a radiação térmica.

O impacto financeiro causado por um incêndio em um transformador seja pela aquisição de um equipamento novo, pela recuperação ou substituição do mesmo é algo que se deve levar em conta, pois transformadores de potência são os equipamentos mais dispendiosos em uma subestação por exemplo.

Além dos custos diretos em relação ao transformador, aos equipamentos e estruturas afetadas, há o risco e o impacto da indisponibilidade, da má reputação da organização, além de custos de ordem jurídica junto às seguradoras.

6 CONCLUSÕES

Conforme mencionado no capítulo introdutório deste trabalho, o não gerenciamento dos riscos de incêndios em transformadores de potência é uma questão que afeta organizações do setor elétrico, consumidores e a sociedade em geral. Pode-se observar que inúmeros casos de interrupção do fornecimento de energia elétrica no Brasil nas duas últimas décadas foram conseqüências de incêndios em transformadores de potência. E algumas conclusões podem ser facilmente percebidas sobre isso.

Estas interrupções proporcionam impactos a diversos setores da sociedade, sobretudo aos clientes consumidores das organizações, sejam eles: indústrias, instituições públicas, empresas de comércio e serviços e aos próprios consumidores residenciais. Vale ressaltar que a própria organização sofrerá algum tipo de punição por parte do governo através das agências reguladoras que regulamentam a o setor elétrico. A organização ainda terá que arcar com custos de razão jurídica junto à seguradoras e no pior dos casos haverão custos de recuperação ou substituição de equipamentos e instalações danificados.

Entretanto a pior conseqüência que se pode ter em relação ao não gerenciamento dos riscos de incêndios em transformadores de potência, trata-se da integridade física dos seres humanos envolvidos na atividade ou não.

Outra conseqüência importante é o impacto ambiental causado por um incêndio em um transformador, a fumaça liberada pela queima do óleo mineral de um transformador, bem como o derramamento do mesmo em subestações onde não há dique de contenção (vide Capítulo 2). são eventos indesejados ao meio ambiente.

Desta forma, o presente trabalho tenta alertar para os efeitos do não gerenciamento dos riscos de incêndio em transformadores, oferecendo um estudo das principais causas e conseqüências ou impactos dos mesmos.

6.1 Resumo das Atividades

Inicialmente se mostrou necessária uma pesquisa sobre o setor elétrico brasileiro e os casos de incêndio em transformadores de potência e o que os mesmos ofereceram de negativo para a sociedade em geral. A interrupção do fornecimento de energia elétrica foi um tema de bastante repercussão a alguns anos durante a crise energética que o país enfrentou, aliado a

essa crise tivemos alguns casos de incêndios que contribuíram ainda mais para casos de caos no setor elétrico.

Ao se falar em incêndios em transformadores, é necessário não só defini-lo como também conceitua-lo e apresentar os seus principais componentes e sistemas de proteção.

Uma conceituação de termos inerentes a uma análise de riscos bem como as técnicas mais usadas e as escolhidas na identificação dos perigos também foi realizada.

A grande maioria dos casos de incêndios em geral no setor elétrico são devido as falhas em transformadores, a identificação de cenários em transformadores segundo Zalosh (2003) foram apresentados nesse estudo.

Os cenários propostos foram apresentados através de diagramas contínuos e únicos, os quais não apresentam as limitações das árvores de falhas e árvore dos eventos entre outras técnicas de identificação de perigos.

Em seguida foi proposto um modelo teórico sobre incêndio de poça(modalidade de incêndio amplamente discutida na literatura) em transformadores, aspectos da geometria da chama e da energia liberada foi calculada e foram feitas simulações em diversos pontos. O uso de tal modelo foi de bastante utilidade na quantificação de impactos em pessoas, equipamentos e estruturas.

Por fim as conseqüências ou impactos de um possível incêndio em um transformador de potência foram apresentados, entre eles: os impactos indiretos (meio ambiente e reputação da organização), os impactos financeiros devido a indisponibilidade e as conseqüências diretas(impacto em pessoas, equipamentos e estruturas) conforme mencionado no parágrafo anterior.

6.2 Desafios para Trabalhos Futuros

- Uso de modelo teórico para quantificação da energia liberada em incêndios da forma spray.
- Uso de modelo teórico para quantificação da energia liberada em incêndios da forma BLEVE.
- Uso de modelo teórico para quantificação da energia liberada em explosões.
- Análise da eficiência das proteções utilizadas na maioria dos transformadores de potência.

APÊNDICE 1

Calor liberado pela chama para alguns valores de diâmetro da poça

Diâmetro da Poça (m)	Calor Liberado(kW)
0,2	6,23872
0,4	46,6496
0,6	147,39771
0,8	327,62646
1	601,00667
1,2	976,97963
1,4	1461,75054
1,6	2059,07867
1,8	2770,90244
2	3597,83099
2,2	4539,52785
2,4	5595,00805
2,6	6762,86581
2,8	8041,44696
3	9428,97752
3,2	10923,65773
3,4	12523,72908
3,6	14227,52032
3,8	16033,47733
4	17940,18078
4,2	19946,35452
4,4	22050,86734
4,6	24252,72982
4,8	26551,0878
5	28945,2138

Energia incidente para pontos cuja distância a chama são de até 25m

Distância ao Alvo (m)	Energia Incidente no Alvo(kW/m ²). D=0,2m	Energia Incidente no Alvo(kW/m ²). D=1m	Energia Incidente no Alvo(kW/m ²). D=2m	Energia Incidente no Alvo(kW/m ²). D=3m	Energia Incidente no Alvo(kW/m ²). D=4m	Energia Incidente no Alvo(kW/m ²). D=5m
1	0,15	-	-	-	-	-
2	0,04	3,59	-	-	-	-
3	0,02	1,59	-	-	-	-
4	0,01	0,9	-	-	-	-
5	0,01	0,57	3,44	-	-	-
6	0	0,4	2,39	-	-	-
7	0	0,29	1,75	4,59	-	-
8	0	0,22	1,34	3,52	6,69	-
9	0	0,18	1,06	2,78	5,29	-
10	0	0,14	0,86	2,25	4,28	6,91
11	0	0,12	0,71	1,86	3,54	5,71
12	0	0,1	0,6	1,56	2,97	4,8
13	0	0,08	0,51	1,33	2,53	4,09
14	0	0,07	0,44	1,15	2,19	3,53
15	0	0,06	0,38	1	1,9	3,07
16	0	0,06	0,34	0,88	1,67	2,7
17	0	0,05	0,3	0,78	1,48	2,39
18	0	0,04	0,27	0,69	1,32	2,13
19	0	0,04	0,24	0,62	1,19	1,91
20	0	0,04	0,21	0,56	1,07	1,73
21	0	0,03	0,19	0,51	0,97	1,57
22	0	0,03	0,18	0,47	0,88	1,43
23	0	0,03	0,16	0,43	0,81	1,31
24	0	0,02	0,15	0,39	0,74	1,2
25	0	0,02	0,14	0,36	0,69	1,11

Inclinação da chama devido a velocidade dos ventos.

Velocidade do Vento(m/s)	Ângulo de Inclinação (°). Para D=0,2m.	Ângulo de Inclinação (°). Para D=1m.	Ângulo de Inclinação (°). Para D=2m.	Ângulo de Inclinação (°). Para D=3m.	Ângulo de Inclinação (°). Para D=4m.	Ângulo de Inclinação (°). Para D=5m.
4,0	79,2	72,1	68,4	66,1	64,6	63,4
4,5	79,8	73,2	69,7	67,6	66,1	65,0
5,0	80,3	74,1	70,8	68,8	67,4	66,4
5,5	80,8	74,8	71,7	69,8	68,5	67,6
6,0	81,2	75,5	72,5	70,7	69,5	68,6

Relação da altura da chama com o diâmetro de poça e a velocidade dos ventos.

Velocidade do Vento(m/s)	Altura da Chama (m). Para D=0,2m.	Altura da Chama (m). Para D=1m.	Altura da Chama (m). Para D=2m.	Altura da Chama (m). Para D=3m.	Altura da Chama (m). Para D=4m.	Altura da Chama (m). Para D=5m.
4,0	0,1	1,0	2,2	3,4	4,4	5,3
4,5	0,1	1,0	2,2	3,3	4,2	5,1
5,0	0,1	0,9	2,1	3,2	4,2	5,0
5,5	0,1	0,9	2,1	3,1	4,1	4,9
6,0	0,1	0,9	2,0	3,1	4,0	4,8

APÊNDICE 2

Para um melhor entendimento dos resultados da simulação abaixo, será apresentada a seguinte legenda:

- 100%F(s) : Tempo em segundos para ocorrência de 100% de fatalidades.
- 50%F(s): Tempo em segundos para ocorrência de 50% de fatalidades.
- 1-5%F(s): Tempo em segundos para ocorrência de 1 a 5% de fatalidades.

Impacto da energia térmica incidente em seres humanos, para um incêndio de poça de 1m de diâmetro.

Distância (m)	Energia (kW/m ²)	100% F (s)	50% F (s)	1-5% F (s)
2	3,59	637	364	182
3	1,59	1886	1078	539
4	0,9	4028	2302	1151
5	0,57	7406	4232	2116
6	0,4	11876	6786	3393
7	0,29	18234	10419	5210
8	0,22	26353	15059	7530
9	0,18	34438	19679	9839
10	0,14	48146	27512	13756
11	0,12	59133	33790	16895
12	0,1	75405	43089	21544
13	0,08	101535	58020	29010
14	0,07	121321	69327	34663
15	0,06	149005	85145	42573
16	0,06	149005	85145	42573
17	0,05	190009	108577	54288
18	0,04	255852	146201	73100
19	0,04	255852	146201	73100
20	0,04	255852	146201	73100
21	0,03	375468	214553	107277
22	0,03	375468	214553	107277
23	0,03	375468	214553	107277
24	0,02	644706	368403	184202
25	0,02	644706	368403	184202

Impacto da energia térmica incidente em seres humanos, para um incêndio de poça de 2m de diâmetro.

Distância (m)	Energia (kW/m ²)	100% F (s)	50% F (s)	1-5% F (s)
5	3,44	674	385	193
6	2,39	1095	626	313
7	1,75	1660	948	474
8	1,34	2369	1354	677
9	1,06	3238	1850	925
10	0,86	4280	2445	1223
11	0,71	5526	3158	1579
12	0,6	6916	3952	1976
13	0,51	8590	4908	2454
14	0,44	10458	5976	2988
15	0,38	12716	7266	3633
16	0,34	14749	8428	4214
17	0,3	17428	9959	4979
18	0,27	20056	11461	5730
19	0,24	23467	13410	6705
20	0,21	28040	16023	8011
21	0,19	32043	18310	9155
22	0,18	34438	19679	9839
23	0,16	40294	23025	11513
24	0,15	43915	25094	12547
25	0,14	48146	27512	13756

Impacto da energia térmica incidente em seres humanos, para um incêndio de poça de 3m de diâmetro.

Distância (m)	Energia (kW/m ²)	100% F (s)	50% F (s)	1-5% F (s)
7	4,59	459	262	131
8	3,52	654	374	187
9	2,78	895	512	256
10	2,25	1187	678	339
11	1,86	1530	874	437
12	1,56	1934	1105	553
13	1,33	2393	1367	684
14	1,15	2905	1660	830
15	1	3500	2000	1000
16	0,88	4150	2372	1186
17	0,78	4875	2786	1393
18	0,69	5740	3280	1640
19	0,62	6620	3783	1892
20	0,56	7583	4333	2166
21	0,51	8590	4908	2454
22	0,47	9578	5473	2737
23	0,43	10784	6162	3081
24	0,39	12283	7019	3510
25	0,36	13667	7810	3905

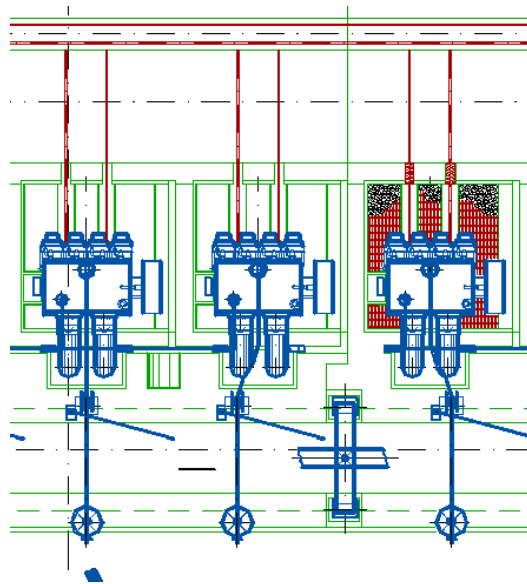
Impacto da energia térmica incidente em seres humanos, para um incêndio de poça de 4m de diâmetro.

Distância (m)	Energia (kW/m ²)	100% F (s)	50% F (s)	1-5% F (s)
8	6,69	278	159	79
9	5,29	380	217	108
10	4,28	504	288	144
11	3,54	649	371	185
12	2,97	820	468	234
13	2,53	1015	580	290
14	2,19	1231	703	352
15	1,9	1487	850	425
16	1,67	1766	1009	505
17	1,48	2075	1186	593
18	1,32	2417	1381	691
19	1,19	2775	1586	793
20	1,07	3198	1827	914
21	0,97	3645	2083	1041
22	0,88	4150	2372	1186
23	0,81	4635	2649	1324
24	0,74	5229	2988	1494
25	0,69	5740	3280	1640

Impacto da energia térmica incidente em seres humanos, para um incêndio de poça de 5m de diâmetro.

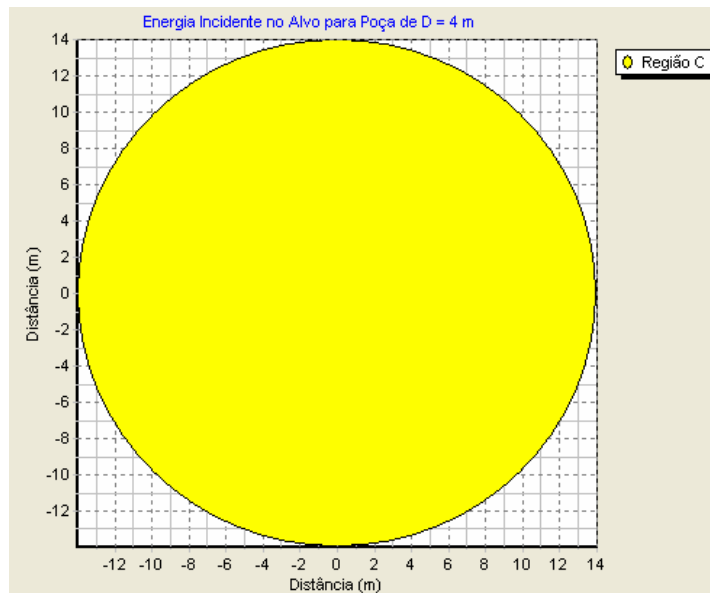
Distância (m)	Energia (kW/m ²)	100% F (s)	50% F (s)	1-5% F (s)
10	6,91	266	152	76
11	5,71	343	196	98
12	4,8	432	247	124
13	4,09	535	306	153
14	3,53	651	372	186
15	3,07	784	448	224
16	2,7	931	532	266
17	2,39	1095	626	313
18	2,13	1277	730	365
19	1,91	1477	844	422
20	1,73	1685	963	482
21	1,57	1918	1096	548
22	1,43	2172	1241	621
23	1,31	2442	1395	698
24	1,2	2745	1568	784
25	1,11	3045	1740	870

APÊNDICE 3

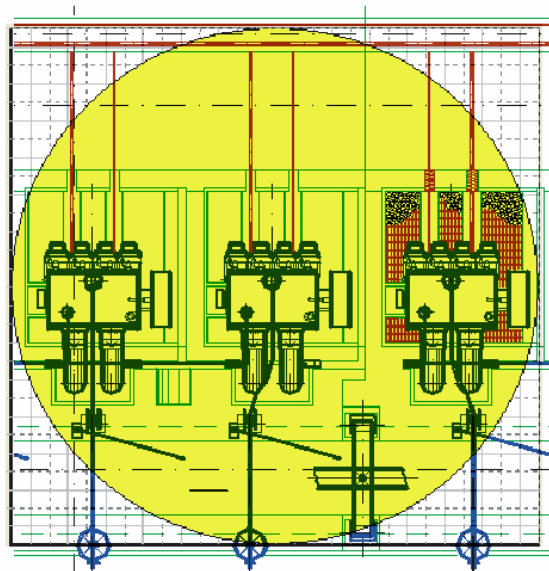


Planta representando parte do lay-out de uma subestação ou de uma usina que utilize transformadores de potência

Legenda: (Região C: Intensidade de energia no alvo $> 2\text{kW/m}^2$ para um raio de 14m).

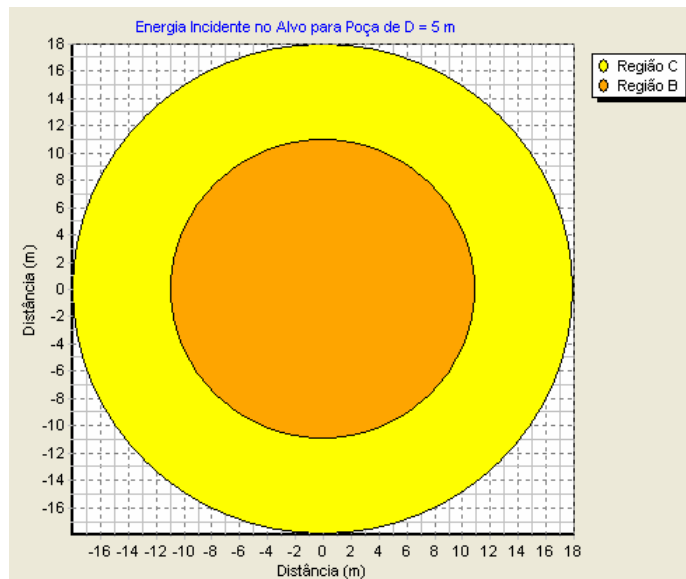


Simulação da energia incidente para um incêndio de poça com diâmetro de 4m

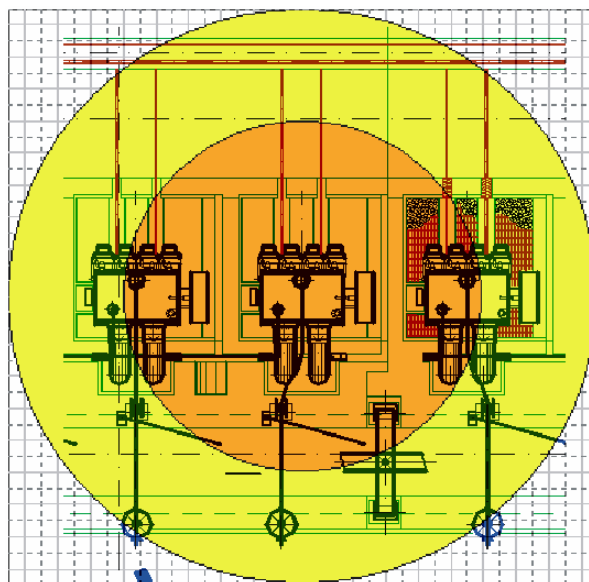


Energia incidente nas vizinhanças de um transformador para um incêndio de poça com diâmetro de 4m.

Legenda: (Região B: Intensidade de energia no alvo $> 5\text{kW/m}^2$ para um raio de 11m;
Região C: Intensidade de energia no alvo $> 2\text{kW/m}^2$ para um raio de 18m).



Simulação da energia incidente para um incêndio de poça com diâmetro de 5m



Energia incidente nas vizinhanças de um transformador para um incêndio de poça com diâmetro de 5m.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/NBR 5034 - Buchas para tensões alternadas superiores a 1kV, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1981.

ABNT/NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão – procedimento, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

AICHE Center for Chemical Process Safety, “Guidelines for Hazard Evaluation Procedures 2nd ed”, American Institute for Chemical Engineer, New York, pp.51-72 (1992).

ANSI/NFPA 30 - Flammable and Combustible Liquids Code, American National Standards Institute/National Fire Protection Association, 1993 Edition.

Babrauskas, V. (1986). Pool fire: burning rates and heat fluxes. Fire Protection Handbook (16th edition), pgs. 21-36.

Brasie, W. C., Simpson, D. W., Guidelines for estimating explosion damage, Loss Prevention, 1968.

Brown, A.E.P., Análise de Risco, Boletim Técnico No. 1 do Grupo de Pesquisa em Segurança Contra Incêndio – USP, (1998).

British Standard BS 5760: Part 2: 1994. Reliability of systems, equipment and components. Guide to the assessment of reliability.

Burgoyne, J.H., Cohen, L. The effect of drop size on flame propagation in liquid aerosols. Proc. Royal Soc., 225, 375 (1954).

Colombo R, Disjuntores de Alta Tensão – Série Brasileira de Tecnologia –Siemens. São Paulo (1986,1987).

Clancey (1972). Diagnostic features of explosion damage. Sixth Int. Mtg of Forensic Sciences, Edinburgh.

Drysdale, D. (1999). An Introduction to Fire Dynamics (2^o edição). John Wiley and Sons.

Duarte, D. (1992). Comece um programa de prevenção de perdas entendendo o que é ignição. Revista Cipa. Brasil: , v.13, p.46-48.

Duarte, D. (1995). The effect of local Confinement on the ignition of flammable vapor/air mixtures at a hot surface. Interflame '93, Oxford/UK.

Duarte, D. (1996). Riscos Tecnológicos Meio Ambiente e Qualidade. Revista Qualidade. Brasil: BANAS, v.49, p.50-54, 1996.

Duarte, D. (1998). The influence of the geometry of the hot surface on the local confinement. Process Safety Progress. Estados Unidos: AIChE, v.17, p.68-73.

Duarte, D. (1998). Mechanics of Ignition and Hot Surfaces. Journal of Applied Fire Science. USA: Baywood Publishing Company, v.7, p.165-180.

Duarte, D. (2000). Gerenciamento dos riscos do processo: Uma nova maneira de pensar In: Produção e Competitividade Aplicações e Inovações.1 ed. Recife: Editora Universitária, v.1, p.81-125.

Duarte, D.(2001). Hazard Identification using nem logic Diagrams and Descriptors. Process Safety Progress, v.20, n.2, p.157-167.

Duarte, D.(2004). A performance overview about fire risk management in the Brazilian hydroelectric generating plants and transmission network. Journal of Loss Prevention in Process Industries, v.17, p.65-75.

Duarte, D. C. L., Bezerra, A. Incêndio em Cabos In:XXIII ENEGEP, 2003, Ouro Preto. Anais do XXIII ENEGEP., 2003. v.1.

Duarte, D. C. L., Droguett, E. L., Denys, S. Identification of the Hazards With a New Logic Diagram and Descriptor Performance In :17th World Petroleum Congress, 2002, Rio de Janeiro. 17th World Petroleum Congress., 2002. v.1, p.183-184.

Duarte, D. C. L., Arruda, L. Gerenciamento dos riscos para o setor elétrico In: XIX ENEGEP, 1999, Rio de Janeiro. ENEGEP'99., 1999.

Fitzgerald, R., “The anatomy of the building fire safety volume 1”, unpublished book.

GCOI/CDE. Relatório Técnico sobre a Análise Estatística de Desempenho de Transformadores, Grupo Coordenador para Operações Interligadas/Comissão de Desempenho de Equipamentos e Instalações, 1996.

IEEE Std 979-1994. Guide for Substation Fire Protection, Institution of Electrical and Electronics Engineers, 1984.

JEAG 5002. The fireproof measure guide in the transformer substation, Japan Electric Association, 2001 Edition.

Lawley, H.G. (1974) “Operability Studies and Hazard Analysis, Chemical Engineering Progress”, v. 70, n^o 4, p. 45-56, April, NY, USA.

Mamede J. Manual de Equipamentos Elétricos. 2.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1994

Mudan, K. S., Croce, P. A., Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section3, Chapter 11, NFPA 1995.

NFPA 15. Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection, National Fire Protection Association, 2007 Edition.

NFPA 70B. Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance, National Fire Protection Association, 2006 Edition.

NFPA 850. Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations, National Fire Protection Association, 2006 Edition.

Raj, P., Models for Cryogenic Liquid Spill Behavior on Land and Water, J. Hazardous Materials, 1981.

Stephens, M., Minimizing Damage to Refineries from Nuclear Attack, Natural and Other Disasters, Office of oil and gas, Washington DC, (1970).

Thomas, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2.ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2001.

Turner, B. A, (1978). Man made disaster. Taylor and Francis, London.

Zabetakis, M. (1965). Flammability characteristics of combustible gases and vapors. Bulletin 627. Bureau of Mines, Department of Interior. Washington, USA.

Zalosh, R. G., Industrial Fire Protection Engineering, Worcester – USA, John Wiley & Sons, 2003.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)