



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

MODELO MATEMÁTICO PARA EXPLOSÕES EM TRANSFORMADORES

ROSEMERI OLIVEIRA PONTES

**RECIFE
2001**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELO MATEMÁTICO PARA EXPLOSÕES EM
TRANSFORMADORES**

ROSEMERI OLIVEIRA PONTES

Orientador: Prof^ª . Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte

Dissertação que apresenta ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte para obtenção do título de Mestre em Ciências na Área de Engenharia de Produção

RECIFE
2001

Pontes, Rosemeri Oliveira

Modelo matemático para explosões em transformadores / Rosemeri Oliveira Pontes. – Recife :

O Autor, 2001.

70 folhas : il., fig., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia de Produção, 2001.

Inclui bibliografia.

1. Transformadores de potência – Explosão – Modelo matemático (TNT). 2. Gerenciamento – Análise de risco. I. Título

621.3.04

CDU(2.ed.)

UFPE

621.314

CDD(21.ed.)

BC2001-153

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GERÊNCIA DA PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ROSEMERI OLIVEIRA PONTES

Prof.^a Dra. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte, Ph.D. (UFPE)

Orientadora

Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D. UFPE

Examinador Interno

Luiz Henrique Alves de Medeiros Dr. INPG

Examinador Externo

RESUMO

Pretende-se no presente estudo analisar os riscos de explosão em transformadores de potência, resfriados a óleo mineral, de aproximadamente 100 MVA. Os transformadores em estudo possuem uma grande quantidade de óleo mineral, ou seja, a carga equivalente de TNT destes transformadores é de aproximadamente 0,5 kg. Logo, no evento de uma explosão, as ondas de choque poderão comprometer o sistema e o meio ambiente. O presente estudo foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa é proposto um modelo matemático para o cálculo das pressões de onda de choque, no caso de uma explosão, decorrente dos gases oriundos de falhas nos transformadores. Na segunda etapa é apresentado uma metodologia para gerenciamento de riscos de incêndio/explosão, a qual é baseada no método de desempenho de engenharia e análise de riscos, isto é, dada a ocorrência de uma explosão nos transformadores, como se comporta uma subestação. Na segunda etapa, também é desenvolvida uma análise de risco para determinação dos impactos que as estruturas adjacentes ao transformador deverão ser submetidas. Como resultado são analisados os impactos existentes numa subestação em decorrência de explosões. Enfim, este trabalho tem o objetivo de estudar o fenômeno físico de explosão em transformadores dentro do setor elétrico, como também, os impactos das ondas de choque durante uma explosão em um transformador com a finalidade de obter meios para se tomar melhores decisões levando-se sempre em consideração as incertezas.

ABSTRACT

Intend in the present study analysy the explosion power risk in transformer, under the water on mineral oil, approximating 100 MVA. The transformer on study had a big quantity of the mineral oil, in spite of, a load equivalent to TNT of these transformers are approximating 0,5Kg. At once, the explosion event, on a shock wave been compromise the sistem and the environment. The present study was divided in two parts. On the first part is proposed one mathmatics models for the calculation to compulsion on shock wave, if has a explosion, current of native vapors of defaults in transformers. On the second stage is introduced a metodology for managing the fired/explosion risk, wich is supported on engineering method of performance and analysis of risk, that is to say, given the event in explosion on the transformers, as be floodgate the under station. On the second part too, is advanced one analise of the risk to determination in impact existent on the adjacents strutures want to be sumit the transformers. As the result is analyze the impact happened on the under station on explosion consequence. At the end, this work have an objective of study the physical phenomenon on transformers at explosion in eletrical sector, as too, the sock wave impacts during the explosion on one transformers with objective to get means to have the best decisions to take away the uncertainly considerations.

SUMÁRIO

	Pag.
AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
SUMÁRIO	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
SIMBOLOGIA	XI
1 INTRODUÇÃO	1
2 MECANISMOS DE FALHAS DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA...	5
2.1 DESCRIÇÃO GERAL DO TRANSFORMADOR.....	5
MECANISMOS DE FALHAS DOS TRANSFORMADORES.....	7
CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	27
ONDAS DE CHOQUE.....	28
CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE	29
2.5 INFLUÊNCIAS SOBRE OS LIMITES DE FLAMABILIDADE.....	30
2.6 LIMITES DE FLAMABILIDADE VERSUS LIMITES DE DETONABILIDADE	34
2.7 MODELO TNT.....	35
2.8 EXPLOSÃO	37
3 MODELANDO UMA EXPLOSÃO EM TRANSFORMADOR.....	38
3.1 FENÔMENOS E EFEITOS DA EXPLOSÃO	38
3.1.1 EXPLOSÃO	38
3.2 A TEORIA DA EXPLOSÃO NO AR E SUA APLICAÇÃO	40
PARÂMETROS DE ONDA EXPLOSIVA PARA UMA EXPLOSÃO EM UMA ATMOSFERA ILIMITADA.....	41
3.3.1 ONDAS DE CHOQUE.....	41
3.3.2 EXPLOSÕES	44

3.4 DANOS CAUSADOS PELAS ONDAS DE CHOQUE.....	48
3.5 RESPOSTAS HUMANAS PARA AS ONDAS DE CHOQUE.....	50
4 COMENTÁRIOS.....	54
4.1.1 HISTÓRICOS DE ALGUNS GRANDES BLECAUTES NO BRASIL E NO MUNDO.....	54
4.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MODELO USADO.....	56
4.3 CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DO SETOR ELÉTRICO.....	58
PROPOSIÇÃO PARA MEDIDAS MITIGADORAS DOS EFEITOS DAS ONDAS DE <i>BLAST</i>	63
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Visão geral de uma subestação.....	5
Figura 2.2 Transformador de uma subestação de 230/69 KV	6
Figura 2.3 Desenho esquemático de um transformador.....	7
Figura 2.4 Transporte de transformadores	19
Figura 2.5 Elevação de pressão interna dentro do tanque de um transformador de 250 MVA sob diferentes tipos de curto-circuito.	22
Figura 2.6 Probabilidades de explosões de transformadores durante a vida útil em função da potência.....	22
Figura 2.7 Localização da origem de falhas em transformadores	23
Figura 2.8 Desenho esquemático da onda de <i>blast</i>	30
Figura 2.9 Diagrama de flamabilidade para o sistema metano-oxigênio e nitrogênio a temperatura de 26°C e 1 atm.....	34
Figura 3.1 Vistas de uma explosão no transformador de potência	46
Figura 3.2 Níveis de pressão sonora resultante de ondas de <i>blast</i>	53
Figura 4.1 Etapas de gerenciamento de riscos de incêndios/explosão.....	62
Figura 5.1 Barreiras utilizadas na construção de paredes submetidas às pressões atmosféricas e respectivas distâncias	64

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 Gases típicos gerados por falhas do transformador.	14
Tabela 2.2 Gases gerados por falhas elétricas.	17
Tabela 2.3 Comparação da eficiência entre válvulas de alívio de pressão e diafragmas.	25
Tabela 2.4 Mistura dissolvida em isolação celulósica.	27
Tabela 2.5 O perigo do <i>flashover</i>	27
Tabela 2.6 Mínima energia de ignição provocada por uma centelha em ar e oxigênio na pressão de 1atm e 25°C.	31
Tabela 2.7 Limites de Flamabilidade versus Limites de Detonabilidade	35
Tabela 3.1 Pressões da onda de choque em função da distância e da falha elétrica.	47
Tabela 3.2 Alguns efeitos produzidos pelas ondas de <i>blast</i> , segundo Brasie e Simpsom (1958, Clancey (1972) e Glasstone (1980). ..	48
Tabela 3.3 Danos causados pela pressão máxima resultante de uma explosão, segundo Stephens (1970).	49
Tabela 3.4 Possíveis danos a comunidade resultante das ondas de <i>blast</i> (Scilly e High, 1986).	50
Tabela 4.1 Fontes de incertezas presentes no caso de um incêndio ou explosão de um transformador.	57
Tabela 4.2 Distâncias de separação entre transformadores e edificações/equipamentos.	58

1 INTRODUÇÃO

O transformador começou a ser utilizado comercialmente no século XX e vem sofrendo avanços tecnológicos expressivos nestas últimas décadas, que vão desde aplicação de novos materiais na sua fabricação, programas computacionais, novos métodos de ensaios a aumento de potência. Contudo, de um modo geral, os avanços conseguidos não produziram reduções significativas na sua taxa de falha. No desenvolvimento dos sistemas elétricos ocorreram elevações substanciais nos níveis de tensão, corrente e potência dos transformadores o que de certa forma aumentou o nível de complexidade dos fatores causadores de falhas (Pena, em preparação).

Nos sistemas elétricos de potência, o transformador é um equipamento que permite efetuar a ação de transferência de energia elétrica, sendo de vital importância como componente ou equipamento auxiliar em muitos e diferentes tipos de circuitos elétricos. Em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, trabalham-se com as mais diversas tensões e correntes (Simone, 1998).

Um transformador é extremamente importante como um componente ou equipamento auxiliar de ação indireta, cujo funcionamento depende da existência de circuitos magnéticos mutuamente acoplados. Por atuação magnética mútua, comumente chamada de indução mútua, o transformador transfere energia elétrica de um sistema em corrente alternada, a uma determinada tensão e determinada corrente, para um outro sistema, a uma outra tensão e outra corrente, sem alterar a frequência de onda fundamental.

No decorrer da vida útil do transformador, mesmo seguindo um monitoramento bastante eficiente, o seu contínuo funcionamento ocasiona mudanças do estado de sua massa química ou física do comportamento do óleo isolante quando em operação, ou seja, sofre mudanças nas suas propriedades físicas, químicas e elétricas, alterando-se sua estabilidade sob campo magnético, capacidade de transferência de calor e cor devido à absorção de umidade e oxidação, podendo assim gerar uma explosão, que nada mais é do que uma grande liberação de energia acompanhada por um forte movimento do ar, num curto espaço de tempo, cujo processo é detalhado no Capítulo 2.

Um transformador de potência, no caso de uma eventual explosão possui uma carga equivalente, aproximadamente, a 0,5kg de TNT. Logo, as ondas de choque resultante desta explosão, poderão comprometer o sistema de fornecimento de energia elétrica, não só pelos prejuízos causados ao transformador, mas a toda a subestação devido aos danos causados a peças e componentes elétricos e à própria área estrutural. Como resultado, o chamado popularmente de apagão, que em alguns casos são decorrentes de explosão de transformadores é inevitável, isto é, dependendo da configuração do sistema de transmissão ou distribuição, milhares de pessoas ficarão sem energia elétrica.

São incalculáveis os prejuízos causados às indústrias, comércios e comunidades de uma maneira geral, pois como é de conhecimento público que a falta de energia elétrica afeta todos os segmentos da sociedade. Na verdade, nem mesmo o ecossistema é poupado, portanto há, durante a explosão, vazamento de óleo mineral e gases liberados altamente tóxicos para o meio ambiente.

Nos dias atuais, cada vez mais a sociedade depende e requer um fornecimento contínuo de energia, daí a importância de não se medir esforços, na busca da identificação das falhas associadas aos transformadores, nos quais resultam em explosão ou incêndio causando prejuízos sócio-ambientais.

Por estes motivos pretende-se neste estudo quantificar a energia liberada durante a explosão de um transformador de 100 MVA, situado em uma subestação. O modelo a ser utilizado é o de equivalente ao TNT.

O modelo matemático desenvolvido expressa as pressões das ondas de choque em função da distância. Tal modelo de explosão (equivalente TNT) é de fundamental importância para a quantificação dos impactos estruturais e ambientais. E sobretudo para o projeto e implantação dos sistemas de proteção e em especial o gerenciamento dos riscos de incêndio no setor elétrico.

A energia elétrica desempenha na sociedade atual, papel dos mais importantes. Isso faz com que seu processo de obtenção e transmissão deva ser bem protegido e os riscos claramente quantificados. Para se ter uma idéia concreta dos prejuízos (sociais e financeiros), sejam para os usuários ou para a empresa, analisando os blecautes ocorridos na Argentina e em dez

Estados das Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, diferem um pouco em termo de duração e causa, porém os impactos sofridos pela sociedade foram bem semelhantes.

O blecaute da Argentina teve início com um incêndio ocorrido em uma subestação da Edesur no dia 15 de fevereiro de 1999, que deixou, aproximadamente cento e cinquenta mil (150.000) pessoas sem energia elétrica por quatro (04) horas e mais de sessenta mil (60.000) continuaram sem energia por, pelo menos, cinquenta e duas (52) horas. Segundo os peritos da Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE), o incêndio teve início quando um grupo de operários tentava ligar dois cabos de alta tensão, (i.e. 132.000 V cada cabo), um erro técnico na conexão originou o sinistro disse o vice-presidente da ENRE. Assim que teve iniciado o incêndio, o sistema de proteção da subestação atuou tirando a mesma do sistema. Este acidente deu início a uma série de impactos sofridos pela sociedade.

Já no Brasil, informações oficiais atribuem a um raio a causa do curto-circuito que provocou o apagão, ocorrido em 11 de março de 1999. Este acidente deixou aproximadamente setenta (70) milhões de pessoas em dez (10) Estados, além do Distrito Federal, sem luz. O relatório oficial indica como causa do curto-circuito um raio que pode ter caído na subestação de Bauru-Rio de Janeiro ou sobre uma das linhas de transmissão.

O primeiro grande impacto provocado pelos blecautes, ou seja, os ocorridos na Argentina e no Brasil, foi sofrido pelos cidadãos que se encontravam em trânsito, e foram envolvidos pelo caos absoluto com a desativação de centenas de semáforos, provocando longos e demorados engarrafamentos. Situação mais conflitante sofreram os usuários de metrô, que teve algumas linhas paralisadas e outras ficaram com lentidão excessiva o que prejudicou diretamente os passageiros.

Na Argentina, com o passar do tempo outros problemas foram crescendo como por exemplo, os trinta graus (30°C) do verão argentino que se fizeram mais presente sem ventiladores, condicionadores de ar e a falha no sistema de abastecimento de água. Já no Brasil a marginalidade dos grandes centros urbanos, teve maior liberdade para agir.

Quem lamentou profundamente essa falta de energia elétrica, tanto na Argentina como no Brasil, por razões óbvias, foram os comerciantes que tiveram prejuízos generalizados. Seja o edifício garagem, o qual por não poder abrir seus portões elétricos, prendeu vários carros em

SIMBOLOGIA

Q_{ws}	Kcal/kg	Calor específico do explosivo
Q_{wt}	Kcal/kg	Calor explosivo do TNT
R	$m/kg^{1/3}$	Distância entre o ponto considerado e o centro de carga
R_s	$m/kg^{1/3}$	Distância reduzida
W	Kg	Carga equivalente do TNT
W_s	Kg	Carga explosiva real
Δp_ϕ	Kp/cm ²	Pressão de onda de choque
α	-	Yield Factor
ρ	g/cm ³	Densidade
P	Kg	Pressão
μ	m/s	Velocidade
Czo	m/s	Velocidade do som
Q'	kpm	Comprimento expressando energia em relação à pressão atmosférica
Q^*w	kpm	Energia de explosão
R_ϕ	$m/kg^{1/3}$	Raio da onda frontal
Ro	$m/kg^{1/3}$	Distância de Lagrange
t	s	Tempo
K	-	Expoente adiabático
Q	kpm	Viscosidade
Po	Kp/m ²	Pressão atmosférica
τ	s	Duração da sobrepressão
t_ϕ	$s/kg^{1/3}$	Tempo do instante da explosão
$\Delta\xi$	-	Tamanho da rede
M	-	Número de elementos da rede
im'	Kp..s.m ⁻² .kg ^{-1/3}	Impulso da onda de choque específica

seu interior e não pôde receber outros para ocupar vagas. Por outro lado, os escritórios que atualmente não funcionam sem os arquivos do computador ou sem o aparelho de fax. Além disto, não se pode deixar de citar os bares e frigoríficos que sem seus refrigeradores e *freezers* perderam uma boa quantidade de alimentos perecíveis.

Os usuários, porém, não foram os únicos a sofrerem com esses blecautes, as próprias fornecedoras de energia elétrica tiveram muito do que se lamentar. Além da imagem manchada frente à população, sofrendo acusações de pouco investimento em manutenção, as empresas do setor elétrico tiveram um enorme prejuízo com as multas e indenizações a serem pagas aos usuários. No caso da Argentina, existia uma multa prevista no contrato de concessão relativa ao tempo que os cidadãos ficaram sem energia elétrica, algo em torno de um milhão de dólares (US\$ 1.000.000,00) isso sem contar as ações judiciais para ressarcimento de prejuízos (i.e. eletrodomésticos e outros equipamentos danificados).

No Brasil, as empresas de eletricidade depois de sofrerem ameaças de multas no valor aproximado de setenta milhões de reais (R\$ 70.000.000), resolveram ressarcir os prejuízos dos usuários decorrentes do blecaute. O ressarcimento foi estimado em torno de dois milhões de reais (R\$ 2.000.000,00).

As subestações, mais especificamente os transformadores, são um elo vital no sistema de distribuição de energia elétrica. Razão pela qual, diante da tendência mundial de automação (i.e. tele-assistência) das subestações, tornou-se imprescindível um estudo detalhado sobre os riscos de incêndio/explosão inerente às subestações. E dentro deste contexto, os transformadores desempenham um papel dos mais importantes, pois possui a maior carga de incêndio em um sistema de transmissão. Soma-se a isto, o fato de que, no processo de controle a distância das subestações, pode-se trocar os relês por chips, os painéis das casas de comandos por computadores, mas os transformadores não podem ser substituídos, sem que o processo de transmissão/distribuição de energia elétrica fique seriamente comprometido. Razão pela qual, o presente estudo buscou detalhar os riscos associados aos transformadores de potência, bem como propor um modelo matemático que quantificasse as pressões das ondas de choque, no caso de uma explosão, conforme já mencionado.

No Capítulo 2, comenta-se sobre a descrição geral do transformador e as falhas associadas aos mesmos. No Capítulo 3, vê-se os fenômenos e efeitos da explosão e o modelo matemático, no Capítulo 4, mostra-se a importância da energia elétrica e cenários ilustrando alguns fatos de blecautes ocorridos no Brasil e no mundo, No Capítulo 5, proposição para medidas mitigadoras dos efeitos das ondas de *blast*. No Capítulo 6, conclusões e recomendações para futuros trabalhos e no Capítulo 7, constam às referências bibliográficas.

Mecanismos de falhas dos transformadores de potência

2.1 Descrição Geral do Transformador

Num sistema elétrico, os transformadores são utilizados desde as usinas de produção, onde a tensão gerada é elevada a níveis adequados para permitir a transmissão econômica de potência (transmitir energia com tensão elevada e baixa intensidade de corrente, pois a perda da potência, causada pela resistência das linhas de transmissão, diminui sensivelmente), até os grandes pontos de consumo, onde a tensão é reduzida ao nível de subtransmissão e de distribuição, alimentando as redes urbanas e rurais, onde novamente é reduzida para poder, enfim, ser utilizada com segurança pelos usuários do sistema.

Transformadores são elos vitais na distribuição de potência elétrica em subestações, plantas de potência, edifícios e plantas industriais. Devem ser projetados, instalados, ter manutenção e serem protegidos para resistir a condições operacionais desfavoráveis encontradas em serviço, como sobretensão e flutuações de corrente, além de curto-circuito entre espiras. Na figura 2.1, mostra-se uma visão geral de uma subestação e na figura 2.2 um transformador de 230/69 KV.



Figura 2.1 – Visão geral de uma subestação



Figura 2.2 – Transformador de uma subestação de 230/69 KV.

O transformador (fig. 2.3) tem as seguintes partes básicas: bobina ou enrolamento (1) feito de condutores de cobre separados, cada bobina consiste em várias voltas enroladas ao redor de um ferromagnético; núcleo (2) composto de laminações, as laminações são separadas com uma capa fina de óxido ou verniz; o enrolamento-núcleo de montagem é segurado solidamente e é colocado dentro de um tanque de aço (3) que está cheio com um fluido dielétrico (4). Um espaço de expansão ou reservatório de conservação (5) contendo gás (nitrogênio ou ar) é mantido sobre o nível fluido. Os terminais das espiras das bobinas são conduzidas pelo topo do tanque por buchas cerâmicas que contêm fluido de dielétrico e isola os terminais do tanque. São instaladas barreiras de *Presssboard* entre os enrolamentos e núcleo. O papel da barreira é aumentar a integridade dielétrica do transformador. O seletor de derivação (6), está localizado dentro ou fora do tanque. Radiadores (7), com resfriamento natural ou artificial são normalmente utilizados para aumentar o processo de transferência de calor.

Desta forma, as principais partes de um transformador poderiam ser resumidas como:

a) circuito magnético com sua estrutura segura; b) bobinas primárias e secundárias; c) os

terminais e derivações das bobinas e d) o tanque que contém as partes principais do transformador e o fluido dielétrico isolante.

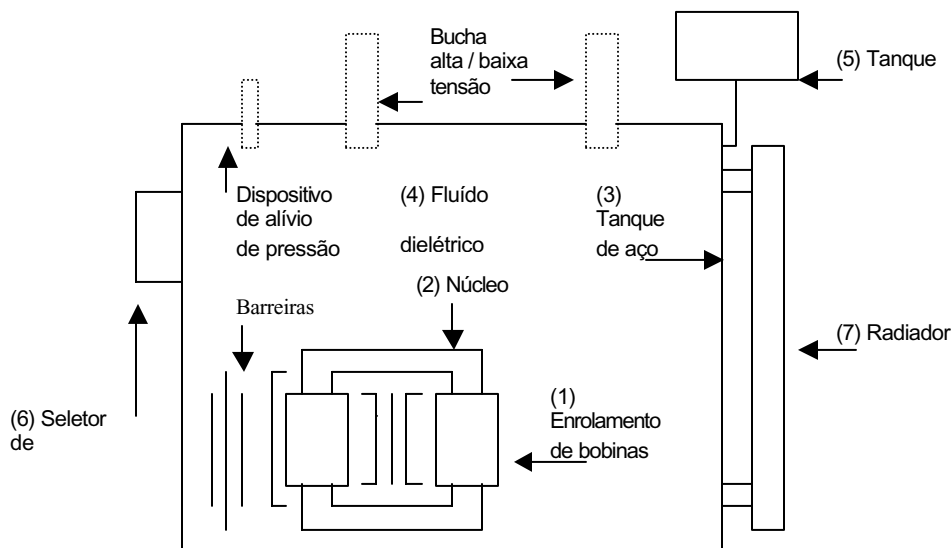


Figura 2.3 – Desenho esquemático de um transformador

1.2 Mecanismos de Falhas dos Transformadores

Em outras palavras pode-se dizer que, na sua concepção mais simples, um transformador é constituído de dois enrolamentos muito bem acoplados, com um núcleo de ferro, porém isolados eletricamente. O enrolamento ao qual é aplicada uma tensão alternada é conhecido como primário. Ele produz um campo magnético que é cortado pelas espiras da outra bobina, chamada secundário, e nesta aparece uma tensão. Os enrolamentos são isolados um do outro, mas são acoplados magneticamente (Silva, 1999).

O transformador simplesmente transfere energia elétrica de uma bobina para outra por indução magnética. Embora os transformadores não sejam 100% eficientes (sem perdas), se aproximam desta condição.

As perdas que se produzem no ferro e no cobre de um transformador (devido a imobilidade de suas partes componentes que prejudica a dispersão do calor) geram calor que provocam a elevação de temperatura das partes ativas (conjunto formado pelo núcleo, enrolamentos, blindagem, calços e ligações) do mesmo.

Por efeito desta elevação de temperatura cria-se um desequilíbrio térmico entre a parte aquecida e o ambiente (ar ou óleo), transmitindo-se desta forma para o ambiente, uma parte do calor produzido.

Quando o número de calorías transmitidas ao ambiente é igual ao número de calorías produzidas pelas perdas, então a temperatura deixa de aumentar. A transmissão de calor para o ambiente processa-se através da superfície de contato entre a parte aquecida e o meio ambiente.

Do exposto compreende-se que a elevação de temperatura da parte ativa do transformador é diretamente proporcional às perdas que nela se produzem e inversamente proporcional à superfície de contato entre esta e o meio ambiente, dependendo ainda do material de que a parte ativa é constituída e do elemento refrigerante.

A imobilidade do transformador, porém, permite o emprego de um meio refrigerante líquido, que é mais eficaz que o ar, o que é feito imergindo-se todo o transformador em uma caixa cheia de líquido apropriado.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), normatizou, tanto a especificação para transformadores, como os procedimentos para recebimento, instalação e manutenção de transformadores imersos em óleo isolante (ABNT – NBR 5356, 5416, 7036 e 7037), as quais encontram-se em processo de revisão. Além destas normas técnicas, a ABNT publicou a NB 1061 – Guia para acompanhamento de óleo mineral isolante de equipamentos elétricos – que pretende orientar os usuários na avaliação das condições de cargas do óleo em serviço.

Os líquidos usados atualmente como isolante e refrigerante em equipamentos elétricos se dividem em dois grupos: isolantes sintéticos e naturais.

Os líquidos isolantes sintéticos surgiram da necessidade de utilização de materiais de difícil combustão, em subestações abrigadas. A diversificação dos tipos disponíveis comercialmente deveu-se principalmente à proibição do uso dos dielétricos à base de PCB' (ascaréis).

Os líquidos isolantes naturais são derivados do petróleo e usados em transformadores, reatores e disjuntores. São classificados em óleos parafínicos e naftênicos conforme os hidrocarbonetos que os constituem sejam predominantemente parafínicos ou naftênicos. Em ambos os tipos também existem hidrocarbonetos aromáticos, em menor proporção.

Os óleos isolantes parafínicos e naftênicos apresentam algumas propriedades físicas bastante diferentes entre si, densidade, ponto de anilina e ponto de fluidez.

No tocante ao desempenho, exige-se o mesmo de ambos os tipos. O antigo Conselho Nacional de Petróleo (CNP), atual Departamento Nacional de Combustíveis (DNC), estendeu até à classe de tensão 145 KV o uso de óleo parafínico.

Os fabricantes de transformadores cuja sede é localizada em países de clima muito frio sempre apresentam uma postura muito conservadora em relação ao óleo de base parafínica face o seu ponto de fluidez ser inferior ao de base naftênica. Tal posicionamento não é aplicável ao Brasil e a prática tem demonstrado que, a operação de equipamentos de nível mais elevado de tensão imersos em óleo parafínico é perfeitamente segura. O que se exige é que o óleo se apresente em boas condições dielétricas, qualquer que seja sua natureza.

Em síntese, o líquido de um transformador exerce duas funções distintas; uma é de natureza isolante e a outra é a de transferir para as paredes do tanque, o calor produzido, pelas perdas elétricas, na parte ativa do aparelho. A fim de executar devidamente estas funções o óleo deve possuir determinadas características entre as quais as mais importantes são: elevada rigidez dielétrica, boa fluidez e capacidade de funcionamento com temperaturas elevadas.

O líquido mais conveniente e universalmente empregado é o óleo mineral, o qual, além de apresentar uma elevada capacidade térmica e um excelente coeficiente de transmissão do calor, é também um ótimo isolante, que apresenta uma rigidez dielétrica quase cinco vezes maior que o ar.

Como já foi dito anteriormente, o óleo isolante “envelhece” em operação, sofrendo mudanças nas suas propriedades químicas, físicas e elétricas. O processo de “envelhecimento” do óleo é progressivo até a precipitação de borra a qual se deposita nas paredes, no fundo do tanque, sobre o núcleo, bobinas e dutos dos radiadores dificultando a dissipação do calor e originando pontos localizados de sobreaquecimento. O isolamento celulósico é severo e irreversivelmente danificado.

A oxidação é decorrente de fatores, tais como: a) ação do campo elétrico; b) concentração do oxigênio dissolvido no óleo; c) efeito da luz; d) temperatura e umidade e e) efeito dos materiais usados na fabricação dos equipamentos.

Para que o óleo possa cumprir sua tarefa de isolante, deve ser isento de umidade e deve poder penetrar facilmente entre as bobinas a fim de impregnar os separadores. Por esta razão, usam-se como separadores, algodão, papel e *presspahn* (material isolante) e excluem-se, borracha e derivados.

Os óleos minerais podem ser conseguidos com uma grande gama de variação em suas propriedades físicas, necessitando-se desta forma se fazer uma série de testes para se escolher

os tipos convenientes para uso em transformadores. Ele deve ser testado sobre os aspectos de: a) comportamento químico; b) ponto de inflamação e ponto de combustão; c) viscosidade; d) perdas por evaporação e e) rigidez dielétrica (Oliveira, 1984).

Na análise do óleo isolante quando da manutenção dos transformadores, a análise físico-química do óleo isolante enfoca duas realidades muito importantes:

- A condição do óleo – na ocasião de aquisição, sua deterioração em serviço ou contaminação externa através de vários ensaios específicos;
- a condição de operação do equipamento detendo falhas ainda incipientes através da análise dos gases dissolvidos no óleo por cromatografia em fase gasosa.

Na análise físico-química do óleo em operação, realizam-se os ensaios que dizem respeito às características passíveis de alteração com o uso, a estocagem (principalmente se inadequada) e para controle do serviço de tratamento.

Nas análises físico-químicas de óleo isolante dos transformadores faz-se ensaios verificando as seguintes condições: a) rigidez dielétrica; b) teor de água; c) fator de perdas dielétricas; d) índice de neutralização e e) tensão interfacial.

A rigidez dielétrica é uma das propriedades elétricas do óleo isolante. É expressa pela tensão (em KV) no qual ocorre descarga entre dois eletrodos metálicos dentro das condições especificadas. Procura-se simular na prática o que pode ocorrer no equipamento.

Os resultados dos ensaios de rigidez dielétrica estão sempre ligados à presença de água no óleo principalmente se ele contiver impurezas sólidas microscópicas mesmo em pequenas quantidades. Se essas impurezas existirem em óleo livre de umidade, a queda na rigidez será desprezível.

O efeito da umidade sobre os resultados dos ensaios depende da forma na qual ela se apresenta.

Um teor muito pequeno de água emulsificada tem influência significativa na redução de rigidez dielétrica, o mesmo ocorrendo com a água em estado livre.

A obtenção de um alto valor no ensaio da rigidez dielétrica não significa estar o óleo em condições satisfatórias, uma vez que este ensaio não fornece dados sobre a presença de ácidos e borra.

Embora o teor de água seja formado em óleo mineral como subproduto da oxidação desta, a maior parte de água existente no óleo é absorvida do ar.

O controle de umidade do óleo isolante é importantíssimo haja vista a sua ação:

- Baixando a rigidez dielétrica do óleo;
- provocando hidrólise de celulose face sua extrema afinidade com a mesma;
- provocando corrosão dos metais com os quais tiver contato.

Ciclos térmicos normais que ocorrem na operação fazem com que o teor de água em equilíbrio entre óleo/celulose se altere e ao sofrer resfriamento (queda de demanda ou à noite) a água que se dissolverá com o aumento da temperatura condensa, podendo migrar para o fundo do tanque ou ser absorvida pela celulose.

Quanto menor o teor de água encontrado nos óleos em operação, mais protegida estará a isolamento sólida e melhor o estado do óleo como dielétrico.

Este ensaio do teor de água é imprescindível para avaliar a eficiência do tratamento de óleo e secagem da parte ativa de transformadores.

A perda dielétrica é outra propriedade elétrica do óleo isolante. O aumento do fator de perda dielétrica sempre está associado à presença de substâncias que causam alta condutividade principalmente se no estado coloidal, formar microemulsão.

A elevação das perdas dielétricas é indicação segura de contaminação com:

- Substâncias metálicas finamente divididas provenientes do ataque aos metais em contato com o óleo ou restos de fabricação;
- produtos de degradação da celulose e do óleo propriamente dito.

O índice de neutralização (acidez) é quando se verifica o teor de ácidos formado por oxidação os quais são diretamente responsáveis pela formação de borra.

Devido o envelhecimento do óleo causar sérios danos aos transformadores, inclusive com riscos de incêndio e explosão, devem ser realizados também, ensaios para verificação do

índice de neutralização por empresas especializadas. Tal ensaio tem provado que, depois de iniciado o processo de deterioração, a acidez aumenta rapidamente sendo imprescindível o seu controle. O controle indicado é a adsorção dos compostos de natureza ácida por meio de argila ativada.

Os resultados do ensaio de acidez sempre são associados aos de tensão interfacial para efeito de julgamento de qualidade de óleo.

A tensão interfacial é definida como força de atração entre moléculas diferentes de óleo e água. Tal força de atração é afetada pela presença de moléculas polares provinda da deterioração do óleo. Deve ser sempre associado ao valor do índice de neutralização quando do julgamento das condições do óleo isolante.

As propriedades físicas e químicas do óleo, assim como dos materiais isolantes são degradadas pela contaminação através da umidade e impurezas (fatores externos) bem como pelo envelhecimento através de reações químicas como o oxigênio do ar ambiente.

Segundo Martorelli (2000), a interpretação dos resultados da análise de gases dissolvidos não pode ser realizada de modo idêntico à da análise físico-química, ou seja, comparando-se com valores limites que a prática consagrou, haja vista os mecanismos e fatores que levam à geração de gases. Entre estes fatores, pode-se citar:

Materiais usados – massa de celulose (variando de acordo com o projeto), tipos de vernizes, tintas, resinas, metais, dentre outros;

projeto – sistemas de conservação, comutação e refrigeração;

incompatibilidade do óleo isolante com algum material usado na fabricação do equipamento;

idade do transformador;

cuidados dispensados ao equipamento por ocasião do recebimento e comissionamento;

esquema de manutenção aplicado à unidade ao longo do tempo;

envelhecimento normal do equipamento;

ou outros problemas a que estão sujeito os transformadores mesmos nas condições normais de operação.

Com relação aos gases, associados aos tipos de falhas, é comprovado analiticamente que alguns tipos de ocorrência durante a operação de equipamentos elétricos conduzem a formação de alguns tipos de gases provenientes da decomposição dos materiais isolantes sólidos e líquidos, isoladamente ou em conjunto. Os critérios para o diagnóstico portanto, se baseiam nas relações entre os teores de gases determinados na análise. A ABNT (1982) através da NBR 7274 – Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço, baseada na Norma IEC 599/78, apresenta o método básico para interpretação das análises de gases dissolvidos.

Usualmente os gases resultam da ação de pressão sobre a isolação de materiais orgânicos. A presença e quantidade desses gases de forma individuais extraídas do óleo e analisados revelam o tipo e a proporção da anormalidade responsável pelos gases gerados.

A presença de gases combustíveis dissolvidos no óleo dos transformadores é mostrada na tabela 2.1.



centelha - uma simples e curta descarga elétrica permanecendo microssegundo ou menos.

Aquecimento térmico: malha de calor e superaquecimento geral:

Malha de calor: superaquecimento localizado. Falhas incipientes pode atingir exteriormente 500 °C, calor suficiente para carbonizar a celulose;

superaquecimento geral: malha de calor exterior.

Arco: uma descarga elétrica prolongada produzindo um arco radiante de chama colorida em contraste da vermelhidão obscura do tipo de corona.

Esses sinais diferem essencialmente da intensidade de energia que são dissipadas pelas falhas.

As causas secundárias dos gases combustíveis acumulando no óleo incluem:

Manta de nitrogênio contaminada;

falta de correção ou retificação antigas;

condição atmosférica;

hidrólise, dentre outras.

Basicamente os principais gases dissolvidos em óleo isolante se originam das seguintes condições:

Oxigênio e nitrogênio - dos gases atmosféricos, geralmente incorporados ao óleo quando da expansão do mesmo durante os ciclos de carga a que está submetidos;

hidrogênio - gás associado a qualquer tipo de falha, desde as mais leves às mais severas. Também pode ser formado em decorrência da eletrólise da água existente em estado livre no interior do equipamento ou ainda em consequência das reações eletroquímicas dos processos corrosivos;

monóxido e dióxido de carbono: gases normalmente associados à deterioração do papel isolante. Também pode ser formada a partir da reação de certas tintas usadas internamente nos equipamentos;

hidrocarbonetos: entre estes, o metano (CH_4) e etano (C_2H_6) por serem gases de estrutura saturada, formam-se facilmente a partir de sobreaquecimento, mesmo em baixas faixas de temperatura.

O etileno (C_2H_4) e o acetileno (C_2H_2) por serem insaturados, exigem maior energia para sua formação. O etileno, que possui uma dupla ligação, é formado então a partir da existência de sobreaquecimento localizado (ponto quente), enquanto que o acetileno, possuindo uma tripla ligação, necessita das temperaturas bem mais elevadas presentes nas descargas elétricas para sua formação.

Para Martorelli (2000), é importante definir a taxa de geração dos gases dentro dos níveis considerados normais. Deve-se enfatizar que a presença de certos componentes é tão preocupante quanto maior seja a sua evolução com o tempo. É fundamental portanto interpretar caso a caso, atentando para as peculiaridades de cada equipamento, quer seja construtivas, quer operacionais, conhecendo os mecanismos da deterioração dos materiais face as diferentes solicitações.

Os transformadores contêm a maior quantidade de material combustível encontrado em uma subestação. Assim, especial atenção deve ser dada à identificação e análise dos riscos a eles associados. Possíveis materiais combustíveis usualmente presentes no transformador são óleo mineral, cabos (i.e. cabos interno ao transformador) e materiais celulósicos. Vale ressaltar



Tabela 2.1 – Gases típicos gerado por falha do transformador

GASES TÍPICOS GERADOS POR FALHA DO TRANSFORMADOR	
NOME	SÍMBOLO
Hidrogênio	H ₂
Oxigênio	O ₂
Nitrogênio	N ₂
Metano	CH ₄
Monóxido de Carbono	CO
Etano	C ₂ H ₆
Dióxido de Carbono	CO ₂
Etileno	C ₂ H ₄
Acetileno	C ₂ H ₂
Embora detectável e identificável a presença de propano (C ₃ H ₈), propileno (C ₃ H ₆) e butano (C ₄ H ₁₀) não têm concentração significativa no transformador.	

Fonte: Stannett, 1965 *apud* Myers; Kelly; Panish, 1981.

Os maiores componentes do transformador são o tanque, a superestrutura, os condutores, a isolação celulósica e a isolação do óleo.

As causas primárias das falhas geradas pelos gases são térmicas, elétricas e esforço mecânico no qual resultam nas seguintes condições:

Corona (descarga parcial) e Centelha:

Corona - tensão elétrica resultando em ionização, primeiro ocorre em torno de 12.000 volts bem agudo levando condutores de corrente

que, vapores combustíveis são gerados pela decomposição do óleo, devido a uma sobrecarga térmica de origem interna ou externa. Para os transformadores localizados no pátio de uma subestação é óbvio que o suprimento de oxigênio é abundante.

O óleo usado no transformador, em geral, possui um alto ponto de fulgor, ou seja, possui uma temperatura mínima de 140°C podendo ficar em torno de 160 a 170°C no máximo, logo é classificado como líquido combustível classe III B, segundo a ANSI/NFPA 30-1993. Devido ao seu elevado ponto de fulgor o óleo usado no transformador pode ser manuseado ou estocado de forma segura. Com relação a origem das falhas, 31% são atribuídas a falhas dielétricas, segundo CIGRÉ (1983).

Uma outra possível causa de incêndios ou explosão em transformadores de potência é o acúmulo de gases combustíveis no interior dos mesmos. Os vapores combustíveis são gerados quando o óleo é submetido a um calor intenso, devido talvez a um arco elétrico, ocorrendo a decomposição e gerando acetileno. Já a presença de uma grande quantidade 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 2.2, 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 afetarão a sua rigidez dielétrica o que poderão resultar em um incêndio. Logo, os vapores combustíveis são um motivo de preocupação quando não devidamente detectados e as medidas cabíveis tomadas.

Tabela 2.2 – Gases gerados por falhas elétricas.

Ó L E O	Fatores Geradores de Gases	Gases
	Arco	Acetileno
	Superaquecimento	Etileno

P A P E L	Superaquecimento	Dióxido de Carbono
Á G U A	Eletrólise	Hidrogênio



As fontes de ignição podem ser excesso de calor tanto dentro quanto fora do transformador. O 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. Por outro lado, as perdas que se produzem no ferro e no cobre de um transformador geram calor que provocam a elevação da temperatura das partes ativas do mesmo. Por efeito desta elevação de temperatura cria-se um desequilíbrio térmico entre as partes aquecidas e o óleo, transmitindo para o óleo uma parte das calorías geradas. Em outras palavras, para que o calor seja retirado das partes ativas do transformador é preciso que estas possuam uma temperatura superior a do óleo. A evaporação do óleo poderá criar uma pressão suficiente que forçará a ruptura do tanque. Esta evaporação do óleo poderá ocorrer como resultado de uma falha elétrica ou de um incêndio externo. Falhas no tanque e no óleo representam cerca de 17% das falhas de um transformador, segundo CIGRÉ (1983). Uma provável seqüência de eventos, incluem:

Falha incipiente ou evento iniciador;

desenvolvimento da falha incipiente dado a não atuação das proteções intrínsecas do transformador;

rápida decomposição do óleo em gases;

formação de bolhas de gás de alta pressão, as quais poderão explodir, talvez próximas às buchas de alta tensão e/ou nas paredes do tanque do transformador;

o cenário mais provável resultante da ruptura do tanque do transformador poderá envolver deformações severas ou a ejeção das buchas. Se houver falhas nas soldas poderá ocorrer a explosão do fundo ou topo, visto que os transformadores são retangulares. Os transformadores com tanque cilíndrico não serão considerados neste estudo.

Segundo a CIGRÉ (1983), 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. 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.

Como um dos equipamentos mais notáveis já desenvolvidos, o transformador tem construção relativamente simples; não possuindo peças móveis ou desgastáveis, teoricamente, tem infinito tempo de vida. Sua eficiência é comparativamente muito alta e sua prolongada vida compensa, de muito, seu custo inicial aparentemente elevado. Não é exagero afirmar que o uso universal do sistema de corrente alternada para transmissão e distribuição de energia elétrica é possível devido ao fato de que esses circuitos de diferentes tensões poderem ser interligados por um conveniente e confiável dispositivo que é o transformador. O

transformador, ou melhor, a adaptação de tensões de diferentes sistemas, tornou possível o enorme desenvolvimento do setor elétrico neste século.

O transformador de potência é um dos equipamentos mais importante da subestação, devendo-se levar em conta: 1) o seu elevado custo; 2) prazo para aquisição, tendo em vista as características especiais e os processos de fabricação envolvidas, por não ser um equipamento disponível comercialmente em curto prazo; 3) dificuldades de transportá-lo montado devido ao peso, dimensões elevadas e fragilidade de alguns componentes; 4) elevado tempo de montagem, considerando as dificuldades e necessidade de recursos logísticos; 5) colocação e homogeneização do óleo isolante, dentre outros (Fig. 2.4).

Devido a sua grande importância é fundamental identificar os modos de falhas de um transformador não só pelo exposto acima, mas pelo prejuízo causado com as possíveis consequências de uma explosão.



Figura 2.4 – Transporte de transformadores.

Segundo Dietrich *et al.* (1983) em pesquisa internacional realizada pelo CIGRÉ, a falha é definida como sendo: “A perda do desempenho de uma função requerida pelo mesmo, de modo que o equipamento deva ser retirado de operação para ser reparado” [11]. Para a Comissão de Desempenho de Equipamentos e Instalações (CDE/GCOI), 1994, 1995, 1996, a

falha é definida como: “Término da condição (habilidade) ou a impossibilidade de uma unidade para desempenhar sua função requerida”.

Por outro lado, sendo o transformador um equipamento indispensável na interligação de sistemas elétricos e considerando as tendências ocorridas no mercado mundial em direção a privatização e à livre competição, vem crescendo nos últimos anos o interesse pelos índices de desempenho e confiabilidade dos transformadores.

O baixo desempenho e a não confiabilidade dos transformadores de potência poderão ter repercussões inaceitáveis. Por exemplo, no caso de sistemas radiais ou mesmo em sistemas em anel sem reserva de potência de transformação, um problema no transformador poderá levar ao corte de cargas prejudicando em última estância, o consumidor. Como resultado, a concessionária poderá apresentar baixos índices de qualidade de fornecimentos de energia, o que prejudicará a imagem da empresa junto à comunidade, sem mencionar o prejuízo causado pela perda de faturamento durante a interrupção de energia elétrica, ações judiciais devido a estas interrupções e ao mesmo tempo poderá sofrer pesadas multas devido a sua ineficiência.

Um dos parâmetros para medir a confiabilidade do transformador é a taxa de falha (hazard rate or failure rate). A taxa de falha $\lambda(t)$ tem como conceito básico determinar a proporção de falhas que ocorrem ao longo do tempo, tomada em relação ao número de componentes expostos a falhas.

$$\lambda(t) = \frac{\text{número de falhas por unidade de tempo}}{\text{número de componentes expostos a falhas}}$$

número de componentes expostos a falhas



Considerando que no contexto atual cada vez mais a sociedade depende e requer um fornecimento contínuo de energia, logo deve haver um grande esforço na identificação das falhas associadas aos transformadores. Vale ressaltar que, tais falhas poderão ser seguidas de uma explosão ou incêndio.

Desde 1993, resultados de análises de explosões têm demonstrado a insuficiência das proteções mecânicas de tanques sob condições de curto-circuito. Os testes e estudos conduzidos pela SERGI (1999), confirmaram que as atuais proteções mecânicas são

insuficientes. De fato, foram demonstrados que os tanques não eram de forma alguma protegidos contra sobrepressões decorrentes de falhas no isolamento. Por mais de quarenta (40) anos a SERGI (1999), tem analisado todas as informações fornecidas por seus clientes quando ocorrem explosões e incêndios em todo mundo.

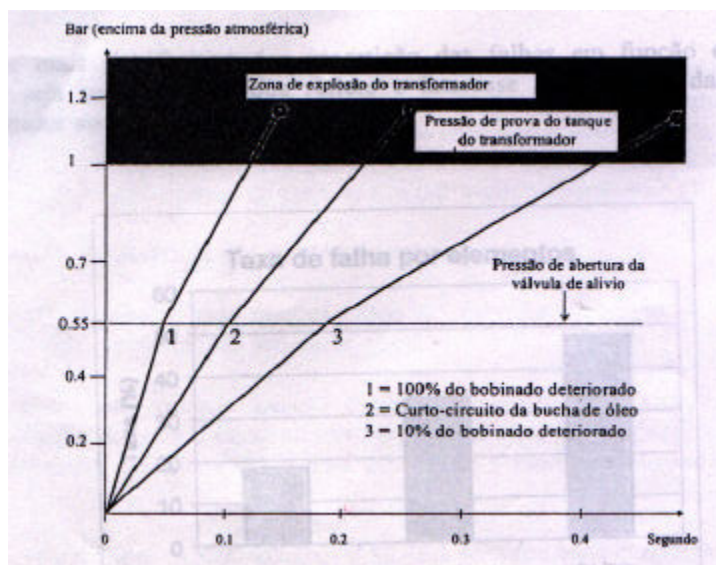
Os incidentes registrados por sistemas de aquisição de dados são estudados rigorosamente. Os dispositivos de aquisição de dados são valiosos porque guardam as seqüências dos efeitos principais. Os dados mencionados a seguir são fundamentais para a análise da informação relacionada aos eventos:

- A primeira ativação das proteções elétricas é considerada a origem de tempo do incidente: T_0 ;
- tempo de abertura da célula do transformador: T_1 ;
- ativação da válvula de alívio: T_2 .

Os conhecimentos das características elétricas e dimensões dos transformadores sob faltas têm permitido classificar os incidentes por tipo, tensão de entrada, tamanho, potência, volume do caso, idade, etc.

A SERGI (*op cite*), desenvolveu um modelo computacional para permitir a simulação dos diferentes tipos de incidentes para transformadores com tensão, potência e volume pré-definidos.

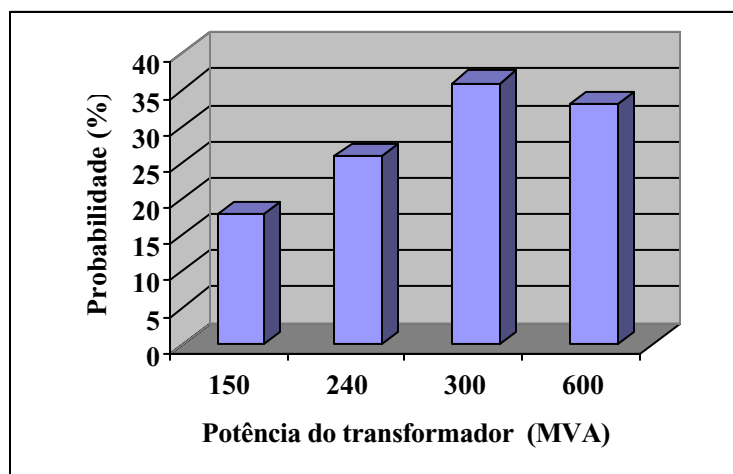
A figura 2.5 mostra exemplos de elevação de pressão dentro de um transformador de 250 MVA para diferentes tipos de incidentes.



Fonte: SERGI (1999).

Figura 2.5 – Elevação de pressão interna dentro do tanque de um transformador de 250 MVA para diferentes tipos de curto-circuitos.

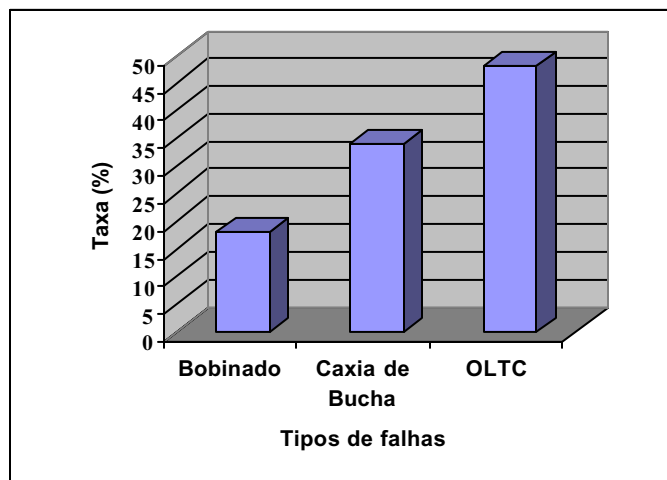
A partir da base de dados que SERGI (1999) possui, com relação às ocorrências de explosões em transformadores de potência é possível destacar as probabilidades para diferentes potências de explosões em transformadores ao longo de sua duração de vida. A figura 2.6, a seguir mostra as probabilidades de explosões para transformadores na faixa de 150 a 600 MVA.



Fonte: SERGI (1999).

Figura 2.6 – Probabilidades de explosões de transformadores durante a vida útil em função da potência.

A análise mais significativa é a repartição das falhas em função de sua origem, qualquer seja sua idade, porque reflete o interesse na extensão das proteções do transformador aos seus equipamentos.



Fonte: **SERGI (1999).**

Figura 2.7 – Localização da origem de falhas em transformadores.

As probabilidades representadas na figura 2.7 são:

- 1) 18% para os rolamentos;
- 2) 34% para as buchas;
- 3) 48% para o comutador de derivações sob carga.

As estatísticas relativa a qualquer idade de transformadores não consideram a evolução do mercado dos equipamentos. Quantidades e origens de falhas evoluíram ainda da seguinte forma:

- Para enrolamento e buchas, elas aumentam principalmente porque as maiorias dos fabricantes mundiais de transformadores e acessórios modificaram seus produtos, fontes de compra e locais das instalações para redução de custos;
- para comutadores de derivação em carga, elas diminuem porque os fabricantes destes equipamentos fizeram grandes avanços tecnológicos.

No negócio da proteção de transformadores de potência, a prioridade foi sempre dada ao tanque porque este contém um grande volume de óleo inflamável, de aproximadamente 40.000 litros de óleo mineral. Além do mais, incidentes em comutadores de derivação sob carga ou caixas de buchas freqüentemente se estendem ao óleo do tanque. É portanto, fundamental estender o campo de aplicação da prevenção contra explosão e incêndio ao transformador inteiro.

As probabilidades de explosões não mostram os indiscutíveis progressos pelos fabricantes de comutadores sob carga ao longo dos últimos vinte (20) anos, que têm aperfeiçoado consideravelmente a tecnologia dos seus produtos.

Atualmente, os transformadores possuem proteções elétricas e válvulas de alívio de pressão. As válvulas de alívio de tanques de transformadores foram criadas há trinta (30) anos atrás. Antes, os transformadores eram protegidos por diafragmas que explodiam com o aumento de pressão.

É importante enfatizar que a única norma técnica internacional relativa a transformadores, IEC76, se refere unicamente a medições de isolamento elétrico e temas relacionados. O documento não inclui nenhuma instrução relacionada à proteção mecânica de tanques de transformadores. Em comparação, a norma inglesa BS 171 especificava uma pressão de projeto de 16 bar (SERGI, 1999).

Na maioria dos casos de explosões de tanques, as proteções elétricas estão funcionando normalmente e a abertura do disjuntor é assegurada. A eficiência das proteções elétricas é relacionada à velocidade com quem é feita a abertura do disjuntor. A tecnologia atual que permite tempos de abertura de 0,085 segundos é insuficiente para evitar a explosão do tanque no caso de um curto-circuito severo.

Segundo a SERGI (apud), apenas poucos casos de válvulas de alívio de sobrepressão salvaram um transformador sob curto-circuito.

Para levar em conta estes elementos a SERGI (apud), orientou suas investigações em direção à eficiência das válvulas de alívio de transformadores:

- As chaminés destinadas a evacuar o óleo incandescente nunca eram dirigidas a um poço de evacuação. O óleo incandescente era evacuado na direção do equipamento vizinho propagando incêndio pelo restante das instalações. O poço de evacuação do óleo, localizado usualmente debaixo do transformador, não era usado;

- uma vez que o impulso do óleo tinha evacuado a energia, o ar podia entrar no tanque provocando a explosão e o incêndio interno.

Tudo indica que a meta principal das válvulas de alívio é apenas evitar a entrada de ar dentro do transformador para evitar as explosões e incêndios que destruíam completamente os elementos do transformador e tornavam seu reparo impossível.

Segundo a SERGI (1999), a pressão máxima suportada pelo tanque do transformador é de 1 bar acima da pressão atmosférica. É usualmente admitido que os transformadores explodam com pressões em torno de 1,2 bar.

A tabela 2.3 permite comparar a eficiência das válvulas de alívio de pressão e os diafragmas utilizados antes de sua invenção.

Tabela 2.3 – Comparação da eficiência entre válvulas de alívio de pressão e diafragmas

Válvula de alívio de pressão: Diâmetro equivalente a um escape à pressão de 1,2 bar. Milímetros	Diafragmas: Diâmetro do fluxo de fluido. Milímetros	Comparação: Total de válvulas de alívio necessárias para alcançar a mesma eficiência que os diafragmas.
25	100 150	1 Diafragma= 16 Válvulas de alívio 1 Diafragma= 36 Válvulas de alívio
50	150 250	1 Diafragma= 9 Válvulas de alívio 1 Diafragma= 25 Válvulas de alívio

Como conclusão pode-se enfatizar que as válvulas de alívio são eficientes apenas para evitar erros em operações de enchimento e filtragem de óleo ou para indicar um alto nível de pressão.

Dentre os componentes presentes numa subestação, os transformadores representam aqueles de maior custo e também de maior carga de incêndio. O fenômeno físico de interesse aqui é a explosão em um transformador de potência, o qual no evento de explosão será o responsável por danos à propriedade (i.e. sistema) e sociais. Para melhor entender o modelo matemático aqui proposto é necessário que seja inicialmente detalhada as falhas que poderão conduzir a uma explosão no transformador.

Como se tem visto, toda falha é indesejável e motivo de preocupação para a empresa concessionária de energia. Os componentes de transformadores responsáveis por mais de 80% das falhas ocorridas (Pena, em andamento) são as seguintes:

- Parte ativa, que é o conjunto formado pelo núcleo, enrolamentos, blindagens, calços e ligações;
- dispositivos de proteção própria que é o conjunto formado por todos os dispositivos de proteção instalados no transformador que possuem a função desligamento;
- comutador de derivações são classificados os comutadores de derivações em carga – CDC e os comutadores de derivações sem tensão – CDST;
- bucha é a peça de material isolante que assegura a passagem isolada de um condutor através de uma parede não isolante.

O óleo mineral usado no transformador apesar de seu elevado ponto de fulgor, quando usado em equipamentos elétricos adquire propriedades outras que reduz o seu ponto de fulgor. No caso de uma explosão, este se comporta como um líquido inflamável.

A quantidade de óleo expelida pelo tanque do transformador depende da localização e da energia liberada pela falha. O entendimento do mecanismo de falha do tanque é fundamental para uma maior compreensão dos danos ao sistema decorrente de um incêndio ou explosão em transformador.

As análises periódicas do óleo e gás dissolvido no óleo são consideradas hoje um método prático e detecta logo a isolação do problema.

Segundo Myers et. al. (1981) atualmente os transformadores operam com temperaturas superiores a 60°C, entretanto, a água no papel torna-se verdadeiramente uma isolação secreta número um. Isto se deve ao fato de que a 80°C a temperatura topo do óleo com 25ppm de água no novo óleo indicado com conteúdo de água dissolvida em celulose por volta de 2,4% a 60°C a mesma condição de óleo indicada ao conteúdo de água em celulose apresenta 3,3 % enquanto que a 40°C é registrado 5,0% e assim por diante. (ver tabelas 2.4 e 2.5).

Tabela 2.4 – Mistura dissolvida em isolamento celulósica

MISTURA DISSOLVIDA EM ISOLAÇÃO CELULÓSICA				
Temperatura topo do óleo (°C)	Condição do óleo	Tempo de Serviço	PPM de H ₂ O no óleo	Percentual de água por unidade de peso seco em celulose (%)
80	BOM	6 meses	25	2.4
60	REGULAR	6 meses	25	3.3
40	RUIM	? anos	25	5.0

Fonte: Stannett, 1965 *apud* Myers; Kelly; Panish, 1981.

7 DEPARTMENT OF SPANISH AND PORTUGUESE

O PERIGO DO FLASHOVER

O PERIGO DO FLASHOVER		
Percentual de água por unidade de peso seco em celulose (%)	Temperatura topo do óleo (°C)	Condição
0.5	95	Bom
1.5	95	Bom
3.3	95	“Roleta”
4.5	90	Flashover
7.0	50	Flashover
8.0	20	Flashover

Fonte: **Stannett, 1965 *apud* Myers; Kelly; Panish, 1981.**

2.3 Considerações Preliminares

Segundo a Norma número 70B da Associação Nacional de Proteção a Incêndio (NFPA) dos Estados Unidos, uma subestação é um sistema elétrico com o objetivo de transformar a voltagem, medição e comutação, sendo também um sistema de proteção. Em geral, são compostas de vários subsistemas, ou seja, equipamentos tais como transformadores de corrente, transformadores de potência, disjuntores, chaves seccionadoras, banco de capacitores e proteções contra descargas atmosféricas.

Dentre os equipamentos encontrados em uma subestação de 230/69 KV, o transformador é o que apresenta a maior carga de incêndio, devido a grande quantidade de óleo nele contido, que é de aproximadamente de 40.000 litros. O óleo do transformador tem duas funções básicas. A primeira como meio de transporte de energia transformada em forma de calor, provocada pelas perdas e para tanto deve circular entre as partes ativas e os radiadores. Essa circulação provoca a dissolução de elementos contaminantes em toda a massa fluída à medida que os mesmos vão sendo gerados. A segunda, como dielétrico entre os componentes ativos e condutores de corrente.

2.4 Ondas de Choque

As ondas de choque representam o fundamento de processos explosivos tomando por base o explosivo e o meio circundado. Até mesmo uma única onda de pressão da detonação propaga-se em estado gasoso, líquido ou sólido. Em seguida, a onda de choque decorrente da detonação é produzida também no meio circundado. Portanto, a teoria das ondas de pressão é muito importante por ser uma ferramenta crucial nas investigações das explosões.

As ondas de choque podem ser definidas como parte do meio em movimento estando em um estado de pressão. O limite entre a parte do meio em um estado de pressão (a onda) e o repouso do meio é chamado de onda frontal.

Qualquer pressão é acompanhada por uma deformação, as ondas de pressão também. Uma deformação é representada por movimentos de partículas de massas. Com fortes ondas a velocidade de partícula da onda de pressão é chamada de “velocidade de massa”, que geralmente é alta.

Uma onda de pressão pura, que não é acompanhada por movimento de partícula, ou uma onda de esforço puro que não é acompanhada por pressão, pode ser produzida unicamente em casos especiais. Um desses casos, ocorrem na colisão de duas ondas de pressão iguais contra outras pressões; o outro caso quando todos os pontos do meio sofrem movimentos iguais (fluem sem pressão).

2.4.1 Classificação das Ondas de Choque

A onda de choque é dividida em pressão normal (tensão, pressão) e pressão tangencial (tosar, tosquiar). As ondas normais são unicamente carregadoras de pressão

normal e onda tangencial carrega unicamente pressão tangencial. Frequentemente, esses dois tipos de onda se estendem das fontes e separam durante a propagação por causa da diferença de velocidade (Henrych, 1979).

As pressões normais causam uma mudança no volume de massa e as pressões tangenciais causam mudança em sua forma. Logo, em adição, há também uma diferença essencial entre o movimento de massa na onda normal e na onda tangencial. Na onda normal as partículas de massa entram em direção da propagação da onda (direção longitudinal) enquanto que, na onda tangencial eles entram em direção normal à direção do movimento (direção transversal). Portanto, ondas normais são também chamadas de ondas longitudinais e ondas tangenciais são chamadas de ondas transversais.

O comportamento das ondas de pressão, e suas modificações no meio dependem primeiramente nas propriedades do meio em si. Para que se compreenda o mecanismo de ondas de pressão deve-se saber as características gerais básicas do meio que são representadas pela relação da pressão em uma compressão de volume unidirecional (pressão positiva) e a deformação de volume relativo (positiva com decréscimo de volume). Por outro lado, deve-se conhecer a relação da propagação da velocidade nas pressões normais na onda longitudinal.

A explosão de um transformador tem como consequência a formação de uma onda de *blast*, a qual consiste de uma onda de choque frontal, seguida de uma onda de expansão que após um determinado período retornará a pressão atmosférica. A magnitude da onda de choque frontal e outros parâmetros a ela associados (tais como velocidade de deslocamento do ar, temperatura do ar na frente da onda, entre outros) dependem das características da energia liberada, bem como da distância equivalente. Os danos causados pelas ondas de *blast* dependem da pressão da onda frontal, a qual é definida como a área sob a pressão positiva da curva pressão versus tempo, mostrada na figura 2.8. As ondas de *blast* dão origem a elevadas pressões, as quais podem causar danos à comunidade, equipamentos e estruturas.

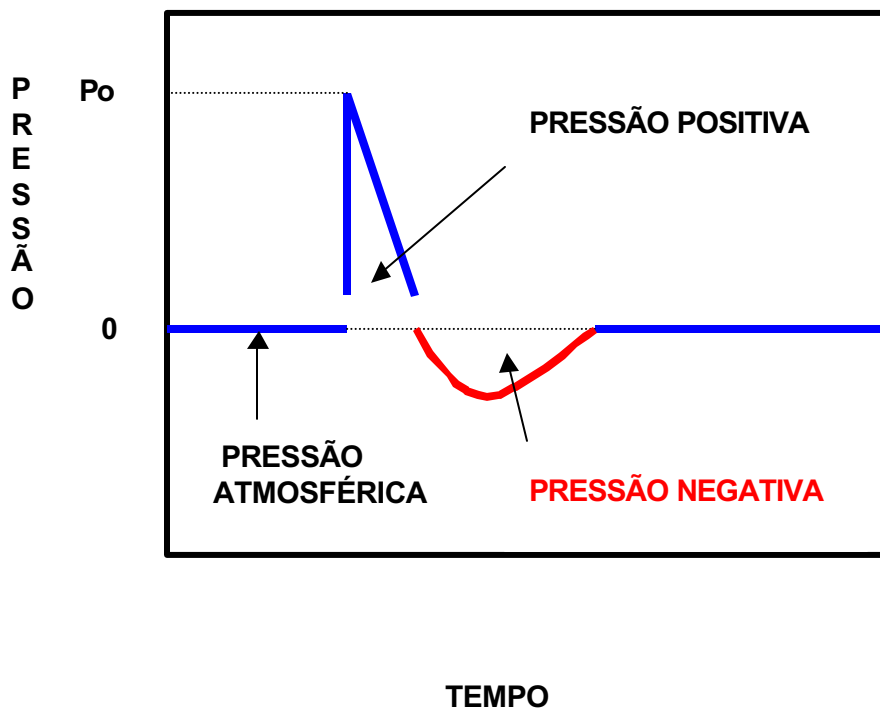


Figura 2.8 – Desenho esquemático da onda de blast

A energia proveniente da explosão de um transformador é basicamente proveniente dos gases sob pressão no tanque de óleo. Em princípio a energia disponível será usada para:

- a) Expansão do transformador;
- b) ruptura do tanque do transformador;
- c) *blast* (i.e. ondas de pressão);
- d) lançamento de fragmentos.

2.5 Influências Sobre os Limites de Flamabilidade

Na prevenção de incêndios e explosões, os conhecimentos acerca dos limites de flamabilidade são de fundamental importância.

Uma mistura inflamável só se queima quando se encontra em uma limitada faixa de concentração. Essa concentração afeta a potência da fonte de ignição. Existe um limite superior e um inferior para que a ignição ocorra. Se a mistura é muito diluída ou muito rica a ignição não será possível, independente da potência da fonte de ignição. Se a

potência da fonte de ignição for muito pequena, os limites de ignabilidade se tornam muito próximos um do outro. Finalmente, se a potência da fonte de ignição for muito baixa a ignição não será possível seja qual for a concentração da mistura.

É evidente que os limites de ignição dependem da potência da fonte de ignição. Por outro lado, quando a propagação da chama independe da potência da fonte de ignição, os limites da mistura são conhecidos como limites de flamabilidade. Assim, muito mais energia é necessária para estabelecer os limites de flamabilidade.

Valores típicos da mínima energia de ignição são mostradas na tabela 2.6

Tabela 2.6– Mínima energia de ignição provocada por uma centelha em ar e oxigênio na pressão de 1 atm e 25°C

COMBUSTÍVEL	MÍNIMA ENERGIA DE IGNIÇÃO (milijoule)	
	AR	OXIGÊNIO
Metano	300	3,0
Propano	260	2,0
n-Hexano	290	6,0
Etano	260	2,0
Etileno	70	1,0
Acetileno	17	0,2
Hidrogênio	17	1,2

Apesar de freqüentemente referir-se a gases como metano, propano, etc., como sendo gases flamáveis, eles apenas são capazes de propagar a chama se estiverem em uma determinada faixa de concentração, a qual é conhecida como limite de flamabilidade.

O limite inferior de flamabilidade diminui com o aumento de temperatura, pois uma menor energia de concentração de combustível/ar será suficiente para propagar a chama através da mistura a uma temperatura elevada.

As influências sobre os limites de flamabilidade dependem de vários aspectos, a saber:

- a) Pressão: uma variação de pressão na faixa de 75 – 100mmHg, ou seja, aproximadamente 0,1atm, afeta muito pouco os limites de flamabilidade dos hidrocarboretos, portanto, é possível determinar os limites a uma pressão reduzida e aplicar os resultados às condições ambientais, a pressão de 200 atm os limites inferior e superior do metano são 4% e 60%, enquanto que a 1atm são 5% e 15%, respectivamente. Mudanças drásticas na pressão é sempre um perigo. Enquanto a mistura permanecer dentro dos limites de flamabilidade o perigo de uma violenta explosão estará sempre presente;
- b) temperatura: os limites de flamabilidade variam conforme a temperatura da chama. A temperatura da chama para a maioria dos hidrocarbonetos é 1.500 ± 150 Kelvin. Devido ao efeito da temperatura nas reações químicas, é de se esperar que os limites de flamabilidade aumente com o aumento da temperatura nas reações químicas. Como resultado, uma mistura considerada não flamável poderá se tornar flamável se a temperatura for significativamente aumentada;
- c) oxigênio: de um modo geral, o limite inferior é praticamente o mesmo no ar ou na presença de oxigênio. Ao passo que o limite superior é o maior na presença de oxigênio do que na do ar. Assim, os limites de flamabilidade tendem a ser maiores na presença de oxigênio;
- d) turbulência: para o metano e etano o limite inferior é reduzido com o aumento da turbulência. Já para o éter o limite inferior é aumentado. Conclui-se assim, que a turbulência resultante das ondas de choque de uma detonação afetam o limite inferior;
- e) adição de agentes extintores: a adição de um agente extintor, ou seja, substâncias quimicamente inertes, em uma atmosfera flamável faz com que os limites de flamabilidade sejam reduzidos; em última instância o limite inferior torna-se igual ao limite superior. Por exemplo, sobre o metano foi observado que quanto a eficiência relativa a extinção de alguns diluentes o dióxido de carbono é o mais eficiente em relação ao nitrogênio e hélio.

Em algumas circunstâncias é necessário saber os limites de flamabilidade associados a outros gases, tais como hidrocarbonetos, oxigênio e nitrogênio. Considere três componentes misturados: metano, oxigênio e nitrogênio, o regime de flamabilidade pode ser representado, conforme mostrado na figura 2.9. Cada eixo do triângulo representa cada um dos componentes da mistura e a região de flamabilidade é indicada nesta figura. O ar é indicado pela linha CA, para a qual a concentração do combustível é nula; sendo as concentrações de oxigênio e nitrogênio, respectivamente, 21 e 79%. A linha CA intercepta a região de flamabilidade em dois pontos, os quais correspondem a 5 e 15%, que são os limites inferior e superior de flamabilidade do metano.

Os limites de flamabilidade do metano em uma atmosfera de puro oxigênio podem ser obtidos no diafragma ilustrado na figura 2.9, através da interseção da região de flamabilidade com o eixo OC, já que o eixo OC indica que a concentração de nitrogênio é nula. Esses limites são 5 e 60%.

Uma outra observação pode ser feita neste diafragma de flamabilidade é que há uma concentração de oxigênio mínima, abaixo da qual o metano não queimará. A linha CL, a qual é tangente a região de flamabilidade, indica que as concentrações a sua direita, isto é, menos de 13% não irão suportar a combustão do metano.

A adição do metano a uma mistura de composição M1 levará a formação de uma mistura de concentração entre M1 e C, a formação da mistura M2. De modo similar se o oxigênio for associado à mistura representada pelo ponto M1, qualquer mistura entre M1 e O poderá ser formada; se o nitrogênio for adicionado qualquer composição entre M1 e N poderá ser obtida. O sinal negativo indica que um componente da mistura foi removido.

Considerem agora o caso em que mais gás é adicionado a mistura M1, por exemplo, metano e oxigênio. Primeiro, o metano é adicionado a M1, formando assim na nova mistura M2. Oxigênio é então adicionado a M2 resultando assim na nova mistura M3. Se o metano e oxigênio são adicionados a uma pressão e volume constante, parte da mistura M1 e M2 poderá escapar e misturar-se com o ar, isto é uma consideração importante, pois há a possibilidade de uma mistura flamável ser formada.

Se um gás inerte for adicionado a um tanque contendo metano, por exemplo, a um volume constante, uma mistura flamável poderá ser formada fora do tanque, devido ao

escapamento de metano para o ambiente; se o metano não for dissipado rapidamente, poderá surgir uma situação perigosa.

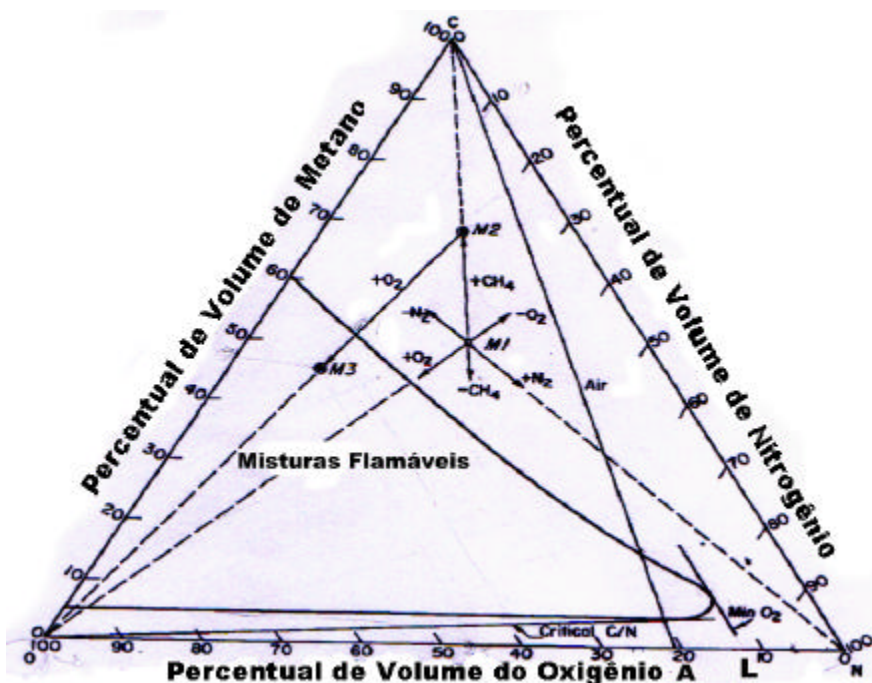
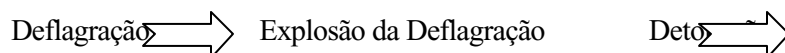


Figura 2.9 – Diafragma da flamaabilidade para o sistema metano-oxigênio e nitrogênio a temperatura de 26°C e 1 atm

2.6 Limites de Flamabilidade Versus Limites de Detonabilidade

Para toda mistura de ar e gás/vapor há uma faixa de concentrações, em que ela é considerada flamável. A mistura estequiométrica, a qual contém a menor concentração de oxigênio para completar a combustão, em geral representa o limite geométrico dos limites de flamabilidade. Todas as misturas que estiverem dentro dos limites de flamabilidade podem explodir, se sofrerem ignição, particularmente se estiverem total ou parcialmente confinadas. Tais explosões são geralmente chamadas de deflagrações, que se caracterizam por um aumento de pressão até oito (8) vezes acima da pressão original. Explosões como estas são comuns, sendo por alguns autores designadas de incêndios. Por outro lado, as misturas

flamável poderão sofrer uma detonação. Tais detonações podem causar um aumento de pressão até vinte (20) vezes maior do que a pressão original, cujas ondas de choques são muito mais danosas do que as resultantes de uma deflagração. As detonações não são freqüentes, contudo elas podem ocorrer em tubulações ou quando uma grande quantidade de material flamável está envolvida, dando seqüência ao seguinte processo de combustão.



Misturas de gases/vapores e ar envolvendo hidrogênio, acetileno e dietil éter podem detonar. Os limites de detonação mostrados na tabela 2.7, não são tão bem estabelecidos quantos os limites de flamabilidade.

Tabela 2.7- Limites de flamabilidade versus limites de detonabilidade

Gás / Vapor	Volume em Ar (%)			
	Flamabilidade		Detonabilidade	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Acetileno	2,50	100,00	4,2	50,0
Hidrogênio	4,00	75,00	18,3	59,0
Dietil éter	1,85	36,00	2,8	4,5

2.7 Modelo TNT

Existem três padrões de explosivos bem utilizados no mercado mundial, ou seja, o trinitrotolueno (TNT), o nitrato de amônia e o *Anfos* (nitrato de amônia com óleo diesel). Neste trabalho adotou-se o equivalente de TNT porque é tido como um padrão explosivo conhecido internacionalmente e bastante utilizado inclusive por militares. TNT é talvez o segundo mais velho conhecido de alto explosivo. Dinamite, é claro, é o primeiro. Isto é o marco de comparação com outras explosões, desde que elas começaram a ser bem conhecidas.

O TNT é usado cortando e rompendo como uma força ou como uma força de carga de um regulador de voltagem para demolições generalizadas tencionando as áreas combatidas. Para formar uma carga para uma meta especial adequada, é removido de um pacote e derretido numa dupla chaleira. Então é lançado imediatamente num modelo, porque TNT, quando derretido, chega a um estado fluído consistente rapidamente.

Como precaução é importante levar em consideração suas características como calor, tamanho, velocidade de detonação, resistência à água, efeitos de temperatura, dentre outras. Como por exemplo, permitir-se a fervura ou cristalização, isto chega supersensitivo e detona com uma pequena dose de choque ou exposição da chama.

Quanto a detonação, o TNT pode ser detonado por eletricidade bélica e uma capa monoelétrica de onda de choque.

Neste trabalho, o desenvolvimento do modelo matemático para a quantificação do risco de uma possível explosão em um transformador foi dividido em duas etapas. A primeira examina o processo com que o óleo libera energia. A segunda refere-se ao processo de como a energia liberada interage com o meio. Do ponto de vista externo tem-se a calcular a pressão da onda de choque transmitida para o meio ambiente em função da distância. Devido a inexistência de um modelo para explosões em transformadores, o modelo usado foi o equivalente ao TNT. Ou seja, a energia liberada por uma explosão em um transformador é transformada em um valor equivalente ao TNT, ou seja, $W = \alpha \cdot w_s \cdot \frac{Q_{ws}}{Q_{wt}}$, sendo então

considerada como uma carga de TNT, onde W é a carga equivalente de TNT, α é a relação do limite superior e inferior de flamabilidade, w_s é a carga explosiva real, Q_{ws} é o calor específico do explosivo e Q_{wt} é o calor explosivo do TNT. Os efeitos de uma explosão são determinados através da lei de distâncias equivalentes proposta por Hopkinton em 1915, a qual é expressa pela equação 3.11 escrita no capítulo 3. A sobrepressão no ponto considerado, (i.e. o valor da onda de *blast*) a partir do transformador é em função da distância equivalente, conforme a explosão de uma massa esférica de gás ideal no ar.

O método de equivalente TNT é usado neste trabalho porque ele é de fácil uso; requer suposições limitadas por determinar a classificação inicial segundo o tamanho e equivalente TNT como também, dados de danos gerados a determinadas distâncias através de altos explosivos são bem conhecidos e extensamente disponíveis.

2.8 Explosão

O aumento instantâneo da pressão interna do tanque de óleo do transformador, poderá ter como consequência a explosão do mesmo. Ou melhor, a explosão de um transformador é um fenômeno-químico com mudança de estado ou massa, a qual se caracteriza pela liberação de uma grande quantidade de energia e movimento de corpos em um curto período de tempo.

Deve-se ter em mente que a explosão de uma carga de TNT é diferente daquela ocorrida em um transformador. Em outras palavras, a energia proveniente da explosão de um transformador é apenas uma pequena fração de energia disponível calculada do calor de combustão. Na explosão de um transformador a energia da onda de *blast* é geralmente uma pequena fração de energia teoricamente disponível calculada através do calor de combustão do óleo. Nesta equação, $W = \alpha \cdot w_s \cdot \frac{Q_{ws}}{Q_{wt}}$, α (i.e. “yield factor”) representa relação entre a energia real da explosão e a energia teoricamente disponível, onde W é a carga equivalente de TNT, w_s é a carga explosiva real, Q_{ws} é o calor específico do explosivo e Q_{wt} é o calor explosivo do TNT e yield factor é a relação dos limites superior e inferior da flamabilidade.

3 Modelando uma Explosão em Transformador

3.1 Fenômenos e Efeitos da Explosão

O potencial do fenômeno de explosão incluem nuvem de vapor de explosões (VCEs), explosões confinadas, explosões de fase-condensada, reações exotérmicas, expansão de vapores de líquidos aquecidos de explosões (BLEVEs) e ruptura de volume de pressão.

O potencial do fenômeno de incêndio incluem incêndio relâmpago, incêndio de poça, fogos de jatos, bola de fogo. Diretriz para avaliar as características desses fenômenos de explosão e incêndios é publicada pela CCPS (Center for Chemical Process Safety).

Explosão:

De acordo com o American Institute of Chemical Engineers (1996), explosão pode ser definida como um fenômeno onde a onda (pressão ou choque) é uma liberação rápida de energia pelo ar. Essa energia pode ter sido originalmente estocada no sistema dentro de variadas formas (i.e. nuclear, química, elétrica, etc). Uma explosão pode ser considerada uma liberação de energia bastante rápida e concentrada para produzir uma onda de pressão que pode ser ouvida. Alguns tipos de construções podem ser perigosas e pessoas podem ser atingidas pelas ondas de *blast*, com efeito indireto adicional de geração de projétil, formação de crateras, colisão no solo e incêndios. Geralmente, como a onda de *blast* percorre um caminho mais longo partindo do centro da explosão a medida que se afasta desse centro perde energia, assim, a magnitude da sobrepressão e outros efeitos experimentais, como um resultado das ondas de *blast* aumenta no início da explosão e decresce com a distância.

Para uma planta de processo, uma importante distinção pode ser feita por uma explosão causada pela liberação da energia química. São as chamadas de deflagração e detonação. A diferença entre uma deflagração e uma detonação é que os mecanismos por onde a energia requerida para ativação da reação explosiva é transferida de uma reação para não reação do material.

Na deflagração, o mecanismo para propagação da reação da explosão dentro do material não queimado é por calor e massa transferida. O material em volta no local de explosão inicial é aquecido sobre sua temperatura de auto-ignição, permitindo a reação para a propagação. Transferir a energia por esses meios é um processo relativamente lento, sempre a razão da propagação que é menor que a velocidade do som dentro de uma não reação do material.

Na detonação, o mecanismo da propagação da explosão é por uma colisão de compressão aquecida. A detonação procede muito rapidamente porque os mecanismos das forças envolvidos de transmissão são rápidas. A velocidade de propagação da detonação é sempre maior que a velocidade do som.

A nuvem de vapor de explosão (*VCE*) resulta na ignição de uma mistura de vapores inflamáveis, gás, aerossol, ou mistos, na qual a velocidade da chama acelera para altas velocidades para produzir sobrepressão significativamente. *VCEs* são geralmente associadas com uma liberação de uma quantidade suficiente de gás inflamável ou líquido vaporizando de um tanque estocado, processo ou transporte do vaso ou sistema de tubulação.

Os fatores que dominam o desenvolvimento de pressão em *VCE* são a existência dos obstáculos que aumentam a turbulência, grau de confinamento e a reatividade do material não queimado (Center for Chemical Process Safety, 1994 *apud* American Institute of Chemical Engineers, 1996).

Nas explosões de rompimento de vasos e *BLEVE* são por exemplo, quando um vaso que contém gás pressurizado rompe e uma propagação de onda de choque percorre uma longa distância da superfície do vaso. Esta onda de choque pode criar os efeitos da sobrepressão o bastante para causar perigos e danos.

As rupturas de vasos podem também acontecer quando uma alta temperatura líquida ou sólida é combinada com uma baixa temperatura líquida, transferindo suficientemente calor de um material mais quente para um material mais frio tal que um material mais frio vaporiza rapidamente; em vez da explosão ocorrer por causa da expansão do líquido mais frio é convertido para vapor, gerando pressões elevadas. Este processo é chamado de explosão física.

Um *BLEVE* é um resultado de um fracasso catastrófico de um vaso contendo líquido com uma temperatura sobre seu ponto de ebulição da pressão atmosférica normal. Quando um vaso falha, o líquido pode evaporar muito rapidamente (evaporação explosiva). O vapor rapidamente expandido comprime ao redor do ar, criando uma onda de pressão de *blast*.

Também com a falha do vaso, podem ocorrer fragmentos. Esses fragmentos do vaso podem ser arremessados a uma significativa distância com uma alta velocidade inicial.

BLEVE são comumente associados com o aumento de líquidos inflamáveis pressurizados, com vasos tendo como consequência um incêndio externo. *BLEVEs* podem produzir efeitos de radiação térmica de uma bola de fogo, assim como efeitos projetados.

Quanto às características dos fragmentos resultantes da explosão podem ter como consequência incluir seu número, tamanho, velocidade e trajetória. Um *BLEVE* e ruptura de vasos de pressão podem produzir fragmentos que voam distante da fonte de explosão. Estes fragmentos primários partidos de vasos original são perigosos e podem resultar em danos para as pessoas e perigo para as estruturas. Também a onda de *blast* de *VCE* ou *BLEVE* pode jogar objetos por causa da propagação das ondas de *blast* associadas.

Em síntese, uma explosão causa sobrepressão e arrasta pressões em construções e outras estruturas. A sobrepressão produz maiores cargas em torno das edificações que enfrentam a explosão por causa de reflexão e menos carga para o telhado e outros lados. Estas cargas causadas nas construções e outras estruturas deformam e estas deformações são suficientemente grandes, perigosas podendo resultar em falhas, American Institute of Chemical Engineers (1996).

3.2 A Teoria da Explosão no Ar e sua Aplicação

O desenvolvimento da onda explosiva comporta-se essencialmente em duas formas, a explosão molecular e a explosão nuclear. Neste trabalho, a onda explosiva resultante da explosão de um transformador é evidentemente da forma de explosão molecular. Em seguida define-se a explosão molecular e sua ocorrência. Basicamente, a explosão molecular surge como um resultado da reação e o produto químico explosivo é convertido quase instantaneamente dentro de gases explosivos que estão em um estado de alta pressão e alta temperatura, ou seja, $3.5 \times 10^3 \div 4 \times 10^3$ °C. Os gases expandem violentamente e forçam o ar circundado fora do volume ocupado. A onda explosiva desenvolve em frente dos gases uma camada de ar comprimido. Particularmente toda a energia da explosão química é convertida dentro da energia da onda de explosão. A explosão dos gases explosivos decresce gradualmente até ficar igual a pressão atmosférica.

3.3 Parâmetros de Onda Explosiva para uma Explosão em uma Atmosfera Ilimitada

3.3.1 Onda de Choque

Os parâmetros de onda de choque de uma explosão ocorrendo numa atmosfera ilimitada de uma esfera de um gás ideal foi determinado usando o método numérico por Brode. Ele introduziu a dimensão do parâmetro p —pressão, ρ —densidade, μ —velocidade, referida à atmosfera (padrão internacional da atmosfera), valores \tilde{p}_0 , $\tilde{\rho}_0$, \tilde{C}_{zo} , onde \tilde{C}_{zo} é a velocidade do som. A distância radial $R(R_0, t)$ é expressada nas formas dimensionais $\tilde{r} = R/Q'$ e $\tilde{t} = R_0/Q'$, onde Q' é o comprimento expressando energia em relação à pressão atmosférica.

$$Q'^3 = \frac{Q^* w}{P_0} = \frac{4\pi}{P_0} \int_0^{R_0} \rho \left(E + \frac{u^2}{2} \right) R^2 dR - \frac{4\pi R_0^3}{3(k-1)} \quad \text{Equação (3.1)}$$

onde $Q^* w$ denota a energia de explosão, R_0 é o raio da onda frontal, R_0 é a distância de Lagrange, t é o tempo e K é o expoente adiabático. O termo subtraído representa a energia interna do gás antes do choque, absorvido pelo choque frontal.

Introduzindo agora a dimensões do tempo $t = t C_{zo}/Q'$ e a dimensão de viscosidade q , medidos em unidade de pressão circundada ρ_0 , as equações de Lagrange de movimento terão as seguintes formas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \left[\frac{2\mu}{\lambda} + \frac{\partial \mu}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \xi} \right)^{-1} \right] \quad \text{massa} \quad \text{Equação (3.2)}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = -\frac{\lambda}{k} \frac{\partial}{\partial \xi} (p + q) \quad \text{momento = andamento} \quad \text{Equação (3.3)}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} [kp + (k-1)q] \quad \text{energia} \quad \text{Equação (3.4)}$$

onde $\mu = \partial \lambda / \partial t$ e $\xi = (Ro/Q')^3 / 3$ é variável Lagrangiana. Na equação da energia, a energia interna do gás ideal tem sido introduzida por meio da relação $\hat{E} = p \rho / P_0 \rho (k-1)$. A viscosidade tem sido introduzida como um dispositivo de controle descontinuidade de choque por meios da relação:

$$q = \frac{9k(k+1)}{4} \left(\frac{M}{3\pi} \right) q (\Delta \xi)^2 \left(\frac{\partial \mu}{\partial \xi} \right) \left(\frac{\partial \mu}{\partial \xi} - \left| \frac{\partial \mu}{\partial \xi} \right| \right) \quad \text{Equação (3.5)}$$

onde $\Delta \xi$ é o tamanho da rede e M é o número dos elementos da rede.

A máxima sobrepressão da onda de choque frontal, $\Delta_{P\phi}$, pode ser escrita na forma de:

$$\Delta_{P\phi} = \frac{6.7}{R^3} + 1 \quad [\text{kp/cm}^2], \quad \Delta_{P\phi} \geq 10 \text{ kp/cm}^2 \quad \text{Equação (3.6)}$$

$$\Delta_{P\phi} = \frac{0.975}{R} + \frac{1.455}{R^2} + \frac{5.85}{R^3} - 0.019 \quad [\text{kp/cm}^2] \quad 0.1 \leq \Delta_{P\phi} \leq 10 \text{ kp/cm}^2 \quad \text{Equação (3.7)}$$

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad [m/kg^{1/3}] \quad \text{Equação (3.8)}$$

$$\Delta_{P\phi} = P_{\phi} - P_0 \quad \text{Equação (3.9)}$$

onde \bar{R} é a distância reduzida $[m/kg^{1/3}]$, R é a distância do ponto considerado do centro de carga $[m]$, W é a carga $[kg]$, P_{ϕ} é a pressão da onda de choque frontal e P_0 é a pressão atmosférica. As fórmulas têm sido adaptadas para o padrão TNT (trinitrotolueno) explosivo e

substituições devem fazer nas unidades indicadas para obter resultados nas mesmas unidades dadas. Por meio de comparação, observe os resultados obtidos:

$$\Delta_{P\phi} = \frac{10.7}{R^3} - 1 \quad [\text{kp/cm}^2] \quad R \leq 1$$

$$\Delta_{P\phi} = \frac{0.76}{R} + \frac{2.55}{R^2} + \frac{6.5}{R^3} \quad [\text{kp/cm}^2] \quad 1 \leq R \leq 15 \quad \text{Equação (3.10)}$$

A primeira fórmula foi derivada por Naumyenko e Petrovskyi (1956) e a segunda por Sadovskyi (1952). Eles estabeleceram as fórmulas com base na teoria de semelhança de modelo; o coeficiente foi derivado experimentalmente.

Segundo Henrych (1959), uma investigação experimental foi levada a cabo, resultando nas fórmulas:

$$\Delta_{P\phi} = \frac{14.0717}{R} + \frac{5.5397}{R^2} - \frac{0.3572}{R^3} + \frac{0.00625}{R^4} \quad [\text{kp/cm}^2] \quad 0.05 \leq R \leq 0.3$$

$$\Delta_{P\phi} = \frac{6.1938}{R} - \frac{0.3262}{R^2} + \frac{2.1324}{R^3} \quad [\text{kp/cm}^2] \quad 0.3 \leq R \leq 1$$

$$\Delta_{P\phi} = \frac{0.662}{R} + \frac{4.05}{R^2} + \frac{3.288}{R^3} \quad [\text{kp/cm}^2] \quad 1 \leq R \leq 10 \quad \text{Equação (3.11)}$$

nos quais são válidos para TNT dentro dos limites dados de R [$\text{m/kg}^{1/3}$].

Em grandes distâncias da carga ($R > 1 \text{ m/kg}^{1/3}$), as fórmulas das equações (3.6), (3.10) e (3.11) permitem estreitos resultados que abordam mutuamente. Entretanto com o decréscimo da distância da carga o desvio dos valores das fórmulas (3.6) e (3.10) dos aumentos de valores da equação (3.11). Os valores da equação (3.11) dá uma explosão química de TNT, um cenário verdadeiro da realidade dentro dos intervalos de R até o ponto da carga, na superfície da carga, $R \approx 0.05$ e $\Delta_{P\phi} = 640 \text{ kp/cm}^2$. Acima dos valores da pressão de equações (3.6) e (3.10) ao $R < 1$ são maiores que aqueles da equação (3.11) e correspondem para explosões nucleares. Para explosivos químicos que não seja tritole os valores de $\Delta_{P\phi}$ dentro do intervalo $R \leq 0.8 \div 1$, obtido das equações (3.11), difere dos valores reais por uma quantia contando com a força disruptiva do explosivo. Dentro do intervalo $1 \leq R \leq 10 \text{ m/kg}^{1/3}$, as fórmulas

(3.6), (3.10) e (3.11) são válidas para todas as espécies de produto químico e explosivos nucleares e dão aproximadamente valores iguais; na equação (3.7) o termo carga deve ser então compreendido como “equivalente do TNT da onda de choque”.

$$W = W_S \cdot Q_{WS} / Q_{WT} \quad [\text{kg}] \quad \text{explosão química} \quad \text{Equação (3.12)}$$

onde W_S é a carga real do explosivo [kg], Q_{WS} é o calor específico real do explosivo [kcal/kg], Q_{WT} é o calor específico de TNT.

Os parâmetros da onda de choque junto a carga foi medida por Adushkim (1961). Ele descobriu que na série $R > 0.8 \div 1$ os gases explosivos são separados lentamente da onda de choque. Até aproximadamente $R \leq 1.6$, os gases explosivos são parte da onda de choque; para $R > 1.6$ a onda de choque propaga em si mesmo e contém unicamente ar. O tempo reduzido multiplicado por 10^3 do instante da explosão $t_\phi = t_\phi / \sqrt[3]{W}$ [s/kg^{1/3}] é projetado no eixo horizontal e a sobrepressão da onda de choque $\Delta p(t)$ é projetado no eixo vertical. Nos ápices dos modelos a distância entre o centro da explosão e o ponto considerado é indicado e expressado em raio de carga $R_w (R_w = 0.053 \sqrt[3]{W})$. O gráfico é projetado ao TNT – hexogeno (50/50%) explosivo ($\rho_w = 1.68 \text{ g/cm}^3$).

Para a duração da sobrepressão, $\tau[s]$, que determina a relação onde $\tau = \tau_{zo} / Q'$, $\lambda = R / Q'$, $Q' = \sqrt[3]{(Q_w^* / P_0)}$, $Q_w^* = W Q_w / {}^0A$ [kpm]; τ é a duração da onda de choque da duração da sobrepressão [s], $C_{zo} = 340 \text{ m/s}$ é a velocidade do som, R é a distância do centro de carga, $P_0 = 1 \times 10^4 \text{ kp/m}^2$, ${}^0A = 1/427 \text{ kcal/kpm}$
 $Q_w^* =$ Energia de explosão.

3.3.2 Explosões

Na literatura referente a explosões em recipientes contendo gás, existe um número muito reduzido de trabalhos experimentais. Além disto, estes trabalhos foram feitos em pequenos vasos, com volumes na faixa de $0,0006 \text{ m}^3 - 0,28 \text{ m}^3$. Vale ressaltar que, o volume de gás dentro do transformador poderá ser de aproximadamente 2 m^3 (i.e. valor máximo,

considerando que o tanque acima do transformador está parcialmente cheio). Esparza e Baker (1977), citam que, para um volume esférico de $0,0006\text{m}^3$ obtiveram uma pressão de *blast* de 54atm. Pittman (1972, 1976), obteve para um volume de $0,17\text{m}^3$ uma pressão de 561atm, e para um volume de $0,28\text{m}^3$ pressões na faixa de 1.020atm e 3.519atm.

Na figura 3.1, podem ser observados estragos causados no transformador de potência após explosão.



Figura 3.1 – Vistas de uma explosão no transformador de potência

A tabela 3.1 abaixo relaciona os valores de pressões da onda de choque em função da distância, a partir do transformador.

Tabela 3.1 Pressões da onda de choque em função da distância e da falha elétrica.

DISTÂNCIA (m)	PRESSÕES DE ONDAS DE CHOQUE FRONTAL							
	CORONA E ELETRÓLISE				ARCO			
	HIDROGÊNIO		METANO		MONÓXIDO DE CARBONO		ACETILENO	
	Psi	Atm	Psi	Atm	Psi	Atm	Psi	Atm
4	71,0	5,0	456,0	32,0	342,0	24,0	128,0	9,0
5	57,0	4,0	299,0	21,0	228,0	16,0	85,0	6,0
6	36,0	2,5	214,0	15,0	171,0	12,0	56,0	4,0
7	31,0	2,2	171,0	12,0	143,0	10,0	45,0	3,0
8	27,0	1,9	143,0	10,0	114,0	8,0	38,0	2,7
9	26,0	1,8	129,0	9,0	85,0	6,0	33,0	2,3
10	23,0	1,6	100,0	7,0	68,0	5,0	30,0	2,1
11	21,3	1,5	85,0	6,0	58,0	4,0	27,0	1,9
12	20,5	1,4	71,0	5,0	51,0	3,6	25,0	1,8
13	19,8	1,4	57,0	4,0	46,0	3,2	25,0	1,8
14	19,2	1,3	51,0	3,6	41,0	3,0	23,0	1,6
15	18,6	1,3	46,0	3,2	38,0	2,7	22,0	1,5
16	18,3	1,3	43,0	3,0	36,0	2,5	21,0	1,5
17	17,9	1,3	40,0	2,8	33,0	2,3	20,0	1,4
18	17,6	1,2	37,0	2,6	31,0	2,2	19,8	1,4
19	17,4	1,2	34,0	2,4	30,0	2,1	19,4	1,4
20	17,2	1,2	33,0	2,3	28,0	2,0	18,9	1,3

Observa-se que nesta tabela 3.1, as determinações das pressões de ondas de choque dos principais gases presentes no transformador decorrentes das falhas que surgem, que, por exemplo, a 9 metros de distância em relação ao transformador o gás acetileno apresenta uma pressão de 2,3 atm, a 15 metros de distância o mesmo gás apresenta uma pressão de 1,5 atm e que a 20 metros de 1,3 atm. Como se vê, na medida que se aumenta a distância em relação ao transformador as pressões das ondas de choque diminuem e assim o comportamento se dá a todos os gases especificados nesta referida tabela.

3.4 Danos Causados pelas Ondas de Choque

A explosão de um transformador é acompanhada de um aumento rápido da pressão de vapor do óleo (talvez com resultados das falhas relacionadas na tabela 3.2) e pela formação de uma onda de choque frontal.

Um dos principais efeitos de uma explosão é a criação de ondas de choque frontal, alguns autores preferem chamá-las de ondas de *blast*. Quando uma onda de *blast* atinge estruturas com um valor de pressão superior ao suportado por elas, tem-se o colapso parcial ou total das estruturas atingidas, pois a maior parte da energia de uma explosão é usada pelas mesmas, dependendo de suas pressões (Tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 e Figura 3.6).

A onda de *blast* sobre as estruturas, normalmente provoca o arremesso de fragmentos e causa grandes danos às estruturas adjacentes. Em geral, é aceito que a energia que não foi transmitida para as ondas de *blast* é usada no lançamento desses fragmentos.

Tabela 3.2. Alguns efeitos produzidos pelas ondas de “blast, segundo Brasie e Simpsons (1958); Clancey (1972) e Glasstone (1980).

ELEMENTO ESTRUTURAL	MODO DE FALHA	PRESSÃO Psi
Janela de vidro, grande e pequena	Destroçada	0,5 – 1
Chapa de aço ondulada ou painéis de asbesto.	Envergamento das conexões	1 – 2
Parede de alvenaria simples, i.e. não estrutural, com espessura entre 20-30 cm.	Cisalhamento	3 – 10
Parede de concreto não estrutural de espessura entre 20-30- cm.	Danos severos poderá ocorrer possível fragmentação.	1,5 – 5,5
Painéis de madeira, modelo padrão usado na construção de casas.	A falha poderá ocorrer nas conexões principais, com um possível desprendimento do painel.	1 – 2
Tanque de estocagem de óleo.	Ruptura	3 – 4
Estruturas de aço de edifício.	Colapso	3 - 4
Vagão de trem carregado.	Capotar	7
Equipamentos (\cong 1,5 toneladas).	Pequenos danos	3

Observa-se que na tabela 3.2 para uma pressão de 0,5 a 1 Psi as janelas de vidro são destroçadas, sejam elas grandes ou pequenas. Para uma pressão de 3 a 4Psi há ruptura e

colapso para o tanque de estocagem de óleo e estruturas de aço em edifícios. Vê-se também que essas pressões atribuídas nesta referida tabela são bem inferiores às pressões determinadas na tabela 3.1 correspondentes aos gases hidrogênio, metano, monóxido de carbono e acetileno. Apesar das pressões em Psi observadas na tabela 3.2 serem inferiores, elas são responsáveis por arremesso de fragmentos caracterizados pelos modos de falhas correspondente ao elemento estrutural ilustrado nesta referida tabela.

Danos estruturais causados pelas ondas de choque têm sido tradicionalmente correlacionados em função da pressão mais alta resultante de uma explosão. Segundo Stephens (1970), na tabela 3.3 relaciona-se os danos associados a elevadíssima pressão, os quais são internacionalmente aceitos. Com relação a referida tabela, vale ressaltar que: a) danos na zona A implica que a estrutura será de tal forma danificada que o seu reparo é economicamente inviável; b) na zona B a estrutura poderá sofrer um colapso parcial e/ou uma falha em algum de seus elementos estruturais; c) na zona C a estrutura necessitará de reparos apesar de sua utilização ser um tanto possível; e d) a zona D inclui vidros quebrados e pequenas rachaduras em paredes.

Tabela 3.3 - Danos causados pela pressão máxima resultante de uma explosão, segundo Stephens (1970).

ZONA	DANOS	PRESSÃO Psi
A	Destruição Total	>8,3
B	Danos Severos	>3,5
C	Danos Moderados	>1,5
D	Danos Leves	<3,5

Com relação às edificações, levando em consideração o efeito das ondas de choque no ar, é aceito que a pressão de 1 Psi é suficiente para causar demolição parcial, enquanto que 10 Psi, em geral causará uma destruição total. As causas de queixas mais freqüentes da comunidade são janelas de vidro quebradas.

Na tentativa de estimar danos estruturais, Scilly e High (1986) demonstraram novas categorias resultantes das ondas de choque, determinando possíveis danos para a comunidade, encontra-se ilustrado na tabela 3.4.

Nesta referida tabela, na categoria A, as casas são completamente demolidas, ou seja, no mínimo 75% das paredes são destruídas. Na categoria B, os danos foram tão severos que as residências deverão ser demolidas. Na categoria Cb, as casas necessitarão de muitos reparos e não deverão ser habitadas até que o reparo seja totalmente concluído e poderão ocorrer danos no telhado, vigas e demolição de uma ou mais paredes externas. Na categoria Ca, as casas necessitarão de reparos e não deverá ser habitada até que seja concluído o reparo. Na categoria D, as casas necessitarão de reparos, contudo poderá ser habitada.

Tabela 3.4 - Possíveis danos a comunidade resultante das ondas de blast (Scilly e High, 1986)

ELEMENTO ESTRUTURAL	MODO DE FALHA	PRESSÃO Psi
Janelas	5% quebradas	0,15
	50% quebradas	0,36
	90% quebradas	0,90
Residências	Portas e janelas	1,30
	Categoria D	0,71
	Categoria Ca	1,80
	Categoria Cb	4,00
	Categoria B	11,5
	Categoria A	26,5



Observa-se que tanto na categoria A como na categoria B, as pressões de 26,5 Psi e 11,5 Psi respectivamente, foram de certa forma elevadas. Se comparada com a tabela 3.3, já teria havido destruição total, tendo por consequência recuperação inviável.



3.5 Respostas Humanas para as Ondas de Choque



O ser humano, dentre todos os fatores ou agentes que se constituem em risco ocupacional, certamente o ruído aparece como o mais freqüente, o mais universalmente distribuído e, no entanto, expondo o mais elevado número de trabalhadores.

Quando se estudam, porém, as perdas auditivas ocupacionais, deve-se levar em consideração a existência de outros agentes causais que não só podem gerar perdas auditivas, como também interagir com o ruído, potencializando seus efeitos sobre a audição. Entre outros, pode-se citar a exposição a certos produtos químicos, as vibrações e o uso concomitante de alguns medicamentos.

Desta forma, o conceito de perda auditiva ocupacional deve ser mais abrangente, considerando o ruído, sem dúvida, como o agente principal, mas sem ignorar a existência de outros, com todas as implicações que estes podem originar em termos de diagnóstico, medidas preventivas, legislação, etc.

A palavra ruído seria reservada a seguinte conceituação: “um fenômeno físico vibratório de um meio elástico, audível, com características indefinidas de vibração de pressão e frequência desarmonicamente misturadas entre si.”

O ruído causa efeitos sobre o ser humano, que vão desde um simples incômodo até alterações ou defeitos permanentes, passando por efeitos temporários, menos ou mais acentuados. Uma sensação desagradável pode ser experimentada quando se ouve uma música tocada forte, em ambiente inadequado, durante uma refeição ou horas de descanso. É comum notar-se uma pulsação mais rápida e mais forte acompanhada de sudorese, após ouvir um ruído forte e repentino. O ruído pode afetar a qualidade do sono das pessoas, comprometendo seu desempenho no dia seguinte. Pode dificultar também a indução do sono, quer no seu início, quer no reinício, depois de acordado durante a noite.

O ruído excessivo, entretanto, pode produzir efeitos mais marcantes sobre as pessoas: auditivos, extra-auditivos, sobre o rendimento no trabalho e sobre a comunicação. Os efeitos auditivos são os efeitos mais conhecidos e mais estudados do ruído intenso, entre eles tem-se a perda auditiva, os zumbidos a perda da discriminação da fala, dentre outros.

A perda auditiva induzida pelo ruído pode ser classificada em três tipos: o trauma acústico, a perda auditiva temporária e a perda permanente.

Recomenda-se denominar de trauma acústico apenas a perda auditiva de instalação súbita, provocada por ruído repentino e de grande intensidade, como uma explosão ou uma

detonação. O trauma acústico, assim conceituado, deve ser distinguido da perda auditiva induzida pelo ruído, de instalação lenta e insidiosa.

Em alguns casos de traumas acústicos, a audição pode ser recuperada total ou parcialmente com tratamento médico. Eventualmente pode acompanhar-se de ruptura da membrana timpânica e/ou desarticulação da cadeia ossicular, o que pode exigir tratamento cirúrgico.

A perda auditiva temporária, conhecida também como mudança temporária do limiar de audição, ocorre após a exposição a ruído intenso, por um curto período de tempo.

Por muito tempo acreditou-se existir uma correspondência direta entre a perda temporária e a permanente. Hoje em dia sabe-se que um ruído capaz de provocar uma perda temporária será capaz de provocar uma perda permanente, após longa exposição.

A perda auditiva permanente é quando há exposição repetida, dia após dia, ao ruído excessivo, pode levar ao cabo de alguns anos, a perda auditiva é irreversível. De instalação lenta e progressiva, passa despercebida por muito tempo. Geralmente a pessoa só se dá conta da deficiência quando as lesões já estão avançadas.

Para se obter algum sentido aos níveis de som, a figura 3.2 apresenta uma situação do ser humano e respostas de pressão as estruturas com níveis de som diferentes juntamente com a escala correspondente em decibel (Ladegaard-Pedersen e Dally, 1975).

Com as vibrações das ondas de ar, a resposta humana ao ruído e as ondas de choque estão de certa forma apresentando respostas um tanto subjetiva. Entretanto, uma ocorrência que trazem queixas constantemente são as quebras de janelas. As rupturas de janelas pelo ar são em função do pico da sobrepressão registrado por investigadores como Ladegaard – Pedersen e Dally (1975). Por causa da natureza aleatória de fatores como o vigor de vidros destruídos por sobrepressões assim como diferentes tamanhos e tipos de janelas, há uma considerável soma de danos estimados. Para um dado grau de ruptura, a sobrepressão correspondente varia por dois ou mais desses fatores.

Compreendendo que as ondas de ar não são usualmente um problema em condições normais das operações, a “United States Bureau of Mines in Pittsburgh”, Pensilvânia, tem

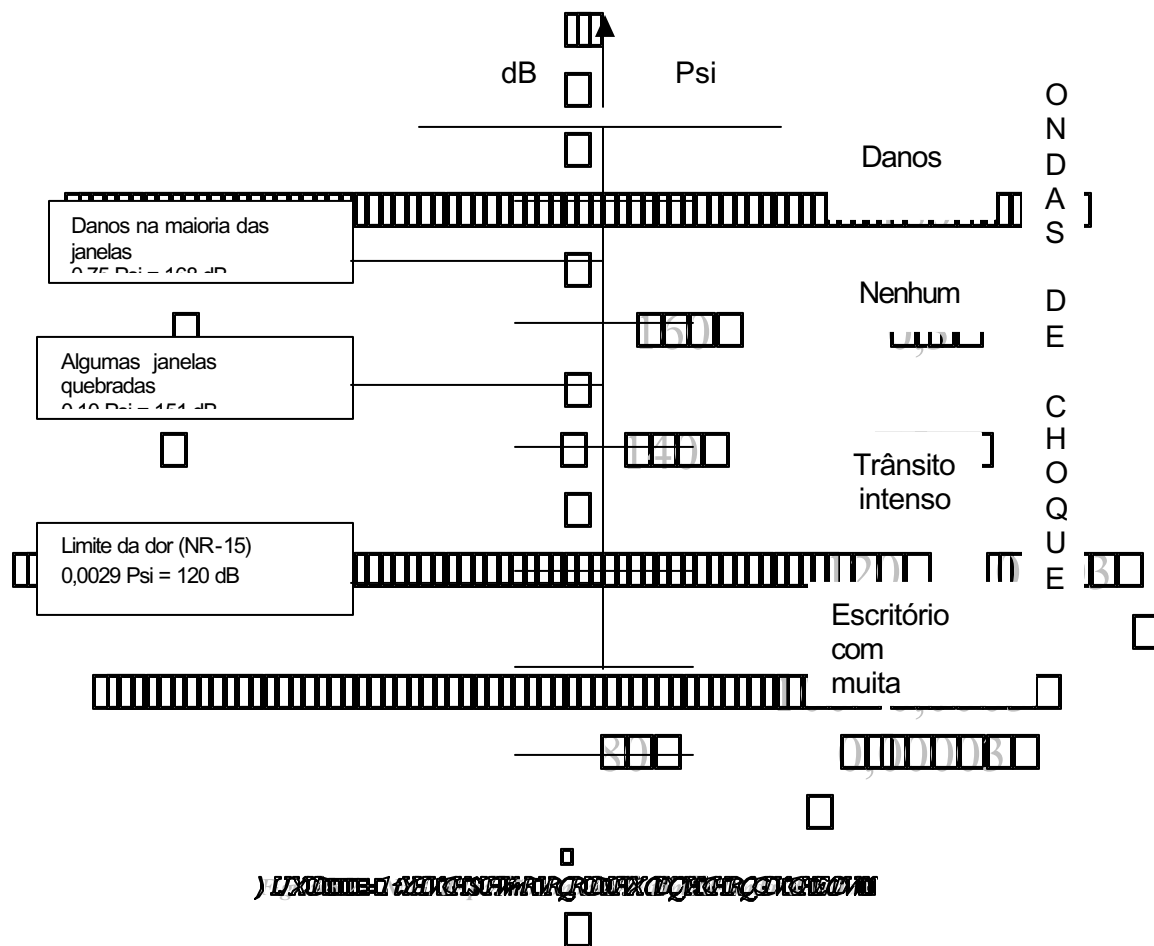
sugerido um pico de sobrepressão de 0,5 Psi (aproximadamente 3.450 N/m^2) como um limite seguro para destruir, embora reconheçam que uma janela pouco pode falhar em 0,1 Psi (aproximadamente 690 N/m^2). Uma sobrepressão de 3.450 N/m^2 corresponde aproximadamente 40% de quebras de janelas.

Uma evolução do envolvimento do ruído e saúde pública foi feita pela U. S. Agência de Proteção Ambiental (1974) e CHABA (comitê em escutar, bioacústico e biomecânicos) Washington, D.C (1968), em discussão com ambos os órgãos determinam critérios de danos ao risco para ruído impulsivo, que foi a base das especificações de armas do Exército, e também um critério modificado é baseado num máximo de 5 decibéis NIPTS (troca de ruído induzido no limiar permanente) em 4.000 Hz em 10% das pessoas depois de 20 anos. O critério original especificado no máximo de 20 decibéis NIPTS em 3.000 Hz em 5% das pessoas que permite um nível de ruído superior a 12 decibéis.

Outro aspecto das ondas de choque é que é protegido para agravar a resposta humana das vibrações. Foster (1977), demonstrou esse efeito. Ele também escreveu que o maior efeito da onda de choque que escreveu em 1976 na exibição de fogos de artifício. Em 20 ocasiões com uma hora de ondas de choque de níveis de 154 decibéis (0.145 Psi) foram realizadas, mas nunca recebeu queixa. Uma operação de pedreira no mesmo local recebeu queixa quando as ondas de choque atingiram em torno de 120 decibéis (0.0029 Psi).

Com o objetivo de mostrar o impacto das ondas de choque nas pessoas é apresentada a figura 3.2, a qual relaciona o nível de ruído suportado pelo ser humano e o seu correspondente nível de pressão.

PRESSÃO SONORA



A norma regulamentadora nº 15 (NR-15) do Ministério do Trabalho, em seu anexo I determina o limite de tolerância para o ruído contínuo ou intermitente em função da máxima exposição diária. A referida norma estabelece 85 decibéis para uma exposição de oito (8) horas diárias, e finalizando em 115 decibéis para 7 minutos de exposição diária de trabalho em ambientes ruidosos. Observa-se que na figura 3.2 o limite da dor de 120 decibéis, tornando-se praticamente impossível a permanência de pessoas em atividades laborais. A referida norma não permite exposição a níveis de ruído acima de 115 decibéis (dB) para indivíduos que não estejam adequadamente protegidos.

4 Comentários

4.1 CENÁRIO

O processo de transformação que atravessa o setor elétrico a nível mundial, tem ocorrido numa tremenda velocidade. Tal fato introduz o risco de não serem adequadamente estabelecidos ou ajustados, os fóruns de coordenação da operação interligada, tão importante para assegurar a confiabilidade da operação, conforme demonstra a análise de blecautes ocorridos no passado. No caso brasileiro, um cuidado adicional precisa ainda ser tomado, já que as condições hidrológicas desfavoráveis, superpostas a um crescimento de mercado superior ao previsto e a atrasos nas novas instalações do sistema, têm levado a uma operação sem folgas. (Lefèvre e Silveira, 1996). Comenta-se que o maior distúrbio do setor elétrico é a ocorrência de *blecautes*. Eles são responsáveis pela interrupção no suprimento ao consumidor que ocorrem por problemas no sistema de transmissão ou distribuição, causando os mais diversos transtornos. Inicialmente, serão apresentadas umas breves descrições de blecautes associadas a problemas na distribuição. Foram pesquisadas notícias nos quinhentos (500) principais jornais americanos durante um ano. Identificaram-se 809 relatos de *blecautes*, tendo como principais causas:

- a) 43% - fatores climáticos/tempo (vento, chuva, calor, enchente, neve, umidade, etc.);
- b) 30% - falha de equipamento;
- c) 15% - acidentes, incêndios, explosões;
- d) 4% - animais (cobras, pássaros);
- e) 2% - desastres naturais (terremotos, furacão, tornados);
- f) 1% - vandalismo/sabotagem.

4.1.1 Históricos de alguns grandes blecautes no Brasil e no mundo:

- 3 O *blecaute* de Nova Iorque ocorrido em 1977 (Lefèvre e Silveira, 1996) – uma descarga atinge uma torre desligando as duas linhas de interligação de 345KV. Em seguida, linhas em sobrecarga desligam por curto-circuito e com elas

transformador por sobrecarga. O esquema de alívio de carga tenta restaurar o equilíbrio entre carga e geração. É entretanto mal sucedido, devido as tensões elevadas surgidas em decorrência do corte de carga e elevada capacitância da rede de cabos subterrâneos. Com isso ocorre o colapso do sistema. O *blecaute* durou vinte e cinco (25) horas e afetou nove (9) milhões de pessoas. Prejuízo estimado em mais de trezentos e cinquenta (350) milhões de dólares (Department of Energy).

- a) em Miami (Tornado, 1997), um tornado atravessou o centro da cidade, por volta de quatorze (14) horas, deixando pelo menos dois (02) feridos, destroços e explosões em transformadores;
- b) *blecaute* da região sudeste do Brasil em 1984 (Lefèvre e Silveira, 1996), dois transformadores de interligação de 500/345 KV em Jaguaru (São Paulo), apresentaram sobrecarga. As medidas operativas tomadas foram insuficientes. Seis (6) Estados brasileiros e quarenta e cinco (45) milhões de pessoas foram afetadas. Outro fato ocorreu em Araraquara II (São Paulo) em 1985. O esquema de controle de emergência causou o desligamento do transformador de 500/440 KV, também por sobrecarga;
- c) Usina de Fumas em 1996 (Lefèvre e Silveira, *op citi*), desligou a usina e as sete (7) linhas de transmissão ligadas ao barramento de 345 KV. A perturbação provocou o desligamento em cascata de transformadores e linhas, principalmente por sobrecarga;
- d) Explosão na Mooca em 2000, zona leste de São Paulo foi provocada por um problema em um transformador de energia elétrica (Explosão, 2000);
- e) Ipanema às escuras (2000), um defeito num dos transformadores da Light, causou pânico e correria em Ipanema, Rio de Janeiro. O estrondo foi provocado por um defeito elétrico no transformador, com capacidade de 500 KVA (Berta e Peixoto, 2000);
- f) em Tijuca, Rio de Janeiro, em 1996, um *blecaute* durou doze (12) horas devido à explosão de um transformador. O gerente regional da empresa, na época, não soube

estimar os prejuízos do apagão na Zona Sul, que prosseguiu à noite em Laranjeiras, na Urca e no Maracanã, mas garantiu que a Light indenizará as pessoas (Aneel, 1998).

Por mais que um sistema elétrico esteja bem projetado e seja bem operado, grandes perturbações acontecem, uma vez que não é econômico ou mesmo possível, protegê-lo para todas as contingências.

Muitas destas perturbações originam *blecautes*, com conseqüências sociais e econômicas bastante severas para uma sociedade mais e mais dependente de energia elétrica. É interessante observar que o problema social é muito associado ao horário e duração da interrupção.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel, 1998), multa a Light em R\$ 2 milhões e a Cerj em R\$ 800 mil. Os *blecautes* provocados pela má qualidade dos serviços prestados pela Light, no Rio de Janeiro, e Cerj, em Niterói e interior do Rio de Janeiro. Foram solicitados providências da instalação de novos transformadores, reforma de redes e subestações, melhor relacionamento com os consumidores e aumento de turmas de manutenção, não provocaram a reversão dos problemas enfrentados pela população.

Aspectos econômicos e financeiros, relacionados às novas exigências que investidores vem impondo às companhias de energia podem vir a criar pressões para que estas passem a privilegiar políticas de operação que promovam o maior retorno financeiro, que nem sempre seriam as que garantiram a maior confiabilidade operativa. Este novo ambiente contrasta com o tradicional no qual, após estabelecer-se uma estratégia operativa “segura”, busca-se a minimização dos seus custos.

4.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MODELO USADO

No presente estudo há incertezas quanto aos danos para a propriedade, sistema, pessoas e quanto às frequências em decorrência de explosões em transformadores de potência. Na tabela 4.1 busca-se relacionar algumas fontes de incertezas existentes no estudo da ocorrência de explosões e incêndios nos transformadores.

Tabela 4.1 – Fontes de incertezas presentes no caso de um incêndio ou explosão de um transformador.

ITEM	PARÂMETRO/SITUAÇÕES	OCORRÊNCIAS/POSSIBILIDADES
A	Cenários para o evento inicial	As faltas ou condições externas ao sistema que resultarão em um incêndio ou explosão.
B	Desenvolvimento do evento inicial	Falhas das proteções intrínsecas ao sistema. Gases solúveis no óleo. Ignição. Explosão. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion – BLEVE. Colapso estrutural.
C	Probabilidade de ocorrer o evento inicial	Frequência. Probabilidade de Ignição. Incêndio em poças.
D	Modelos para os possíveis fenômenos físicos	Incêndio spray. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion – BLEVE Explosão
E	Quantificação do impacto	Energia térmica irradiada. Pressões resultantes da onda de choque. Efeitos tóxicos
F	Medidas mitigadoras	Proteções do sistema existentes como as que serão recomendadas.

Há também uma imensa dificuldade em estimar as incertezas e a confiança dos resultados obtidos, conseqüentemente, os modelos matemáticos e cenários possuem um certo grau de incerteza.

Na tentativa de observar as vantagens desse modelo matemático, este está baseado em conhecimentos teóricos que são amplamente aceitos e desejáveis. Atribuindo-se a isto ao fato

que os nossos resultados foram comprovados por normas internacionais do Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE e National Fire Protection Association – NFPA.

Outra fonte de incerteza é a quantificação do impacto. Os estudos de impactos sobre as pessoas e propriedades são fundamentados em acidentes/desastres já ocorridos, sendo inclusive, difícil de ter uma confiança absoluta nesses resultados.

As edificações ou equipamentos expostos a uma possível explosão de um transformador de potência devem ser protegidas por barreiras. As distâncias de separação entre transformadores e as edificações e/ou equipamentos recomendados pela Factory Mutual Loss Prevention data 14-8 é abaixo relacionada na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Distâncias de separação entre os transformadores e edificações/equipamentos

Volume Óleo (cm³)	Distância Horizontal (metro)			Distância Vertical	Equipamento (metro)
	Construção				
	Resistente chama	Não combustível	Combustível		
1,9	0,9	4,6	7,6	7,6	1,5
1,9 – 19	4,6	7,6	15,2	15,2	7,6
> 19	7,6	15,2	30,6	30,2	15,2

É importante ressaltar, que as distâncias sugeridas pela Factory Mutual estão em conformidade com a NFPA 850, e com a orientação fornecida pelo Instituto dos Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE Std 979 – 1994 item 4.4.1).

Por não existir conflito entre as recomendações da Factory Mutual e da NFPA 850, informa-se que a Factory Mutual se baseia no tipo da construção, no tipo de transformador (na quantidade de óleo). Por outro lado, a NFPA 850 assume que o tipo de construções não é combustível, isto é, são de metais, e sugere-se a distância de separação em função do volume de óleo do transformador que é em torno de 40×10^6 cm³, ou seja, 40.000 litros ou ainda 10.526 galões (Silva, 1999).

4.3 Contribuição do Estudo para o Setor Elétrico

Neste estudo, algumas falhas que conduzem a uma explosão são analisadas e em virtude disto propõem-se à elaboração de um modelo de gerenciamento de riscos inspirado na necessidade de desenvolver uma metodologia principalmente para a análise de desempenho de engenharia e nível de análise associada aos riscos de explosões em transformadores de potência utilizados pelo setor elétrico, que é ilustrado na figura 4.1.

A elaboração do modelo de gerenciamento de riscos envolve sete (07) etapas, ilustrada na Figura 4.1, a saber:

Entendimento do problema: nesta etapa é necessário o conhecimento dos procedimentos e funcionamento normal das operações e determinam o que realmente está em risco com relação as pessoas, propriedade, continuidade operacional, a missão, a comunidade e o meio ambiente. Nesta etapa, o que está em risco deve estar claramente identificado e ter em mente o tipo de risco que deve ser avaliado e gerenciado, bem como os objetivos da empresa como um todo, como também, deve estar definido o que a gerência possui como aceito para as devidas proteções com relação as pessoas, propriedade, missão e responsabilidades;

nível de análise: existem três categorias de incertezas que afetam a segurança, sobretudo o desempenho do sistema em si, a saber: a) as incertezas inerentes que se encontram relacionadas com a variabilidade física do sistema como propriedades do material, geometria dos elementos, distribuição de cargas, dentre outras; b) as incertezas estatísticas surgem de dados estatísticos incompletos e erros de estimação dos parâmetros do modelo de probabilidade; e c) as incertezas da imperfeição do modelo que incluem através da incapacidade de se representar todas as variáveis do fenômeno físico ou do comportamento do sistema. Nos níveis de análise recomenda-se uma avaliação inicial das incertezas, buscando-se oferecer melhores condições na análise de desempenho oferecendo com isso uma melhor segurança e desempenho do sistema por um todo;

análise de desempenho: é nesta etapa que o contexto deste estudo é amplamente abordado, uma vez que esta pesquisa determinará os impactos decorrentes da explosão e o que ficará comprometido. Quatro (4) níveis de avaliação de desempenho são identificados, a saber: a) análise de desempenho nível 1 é quando oferece um rápido acesso ao desempenho do sistema, utilizando apenas uma metodologia como *what if* por exemplo, sendo desenvolvida de forma qualitativa; b) análise de desempenho nível 2 tem por objetivo promover um rápido acesso ao desempenho do sistema, só que utilizando várias metodologias existentes como *what if*, árvore dos eventos, etc., neste nível a análise de incertezas não é quantificada; c) análise de desempenho nível 3 busca entender em detalhe uma avaliação de engenharia, ou melhor dizendo, obter um detalhamento de todas as incertezas, quantificá-las através de modelos matemáticos e simulações computacionais, ter uma grande variedade de questionamentos examinando-os aos detalhes, etc.; e d) análise de desempenho nível 4 é esperado um completo entendimento entre a pesquisa e a engenharia aplicada. Neste nível os resultados terão valores quantitativos obtidos através de experimento em laboratórios, modelos matemáticos e simulações computacionais. As informações detalhadas poderão reduzir as incertezas estatísticas e de imperfeição do modelo. Em outras palavras, é nesta análise de desempenho que alguns questionamentos são respondidos, ou seja, dada a ocorrência de uma explosão num transformador de potência sabe-se qual é a energia liberada. Estão quantificados e dimensionados os sistemas de proteção de risco quanto ao que estarão comprometidos no sistema em si. Sem uma quantificação do impacto tanto o dimensionamento dos sistemas de proteção quanto à análise de risco, com certeza, estarão comprometidos;

análise de exposição ao risco: refere-se a caracterização do risco para as pessoas, propriedades, continuidade de operações, missão da empresa, comunidade e meio ambiente através do que deverá ser determinado na primeira etapa deste gerenciamento de risco que é o entendimento real do problema. Esta análise de exposição ao risco fornece informações sobre a probabilidade de ocorrências e fatalidades, a probabilidade de danos ao sistema e da área afetada. Portanto, essas informações darão condições de adotar ou lançar algumas medidas de

prevenção e recomendações de segurança onde se descreve uma maneira de pensar objetivando compreender todo o desempenho do sistema em si, o que de certa forma tornará a nossa comunicação e entendimento mais eficiente, até porque os “perigos” devem ser estudados de forma sistemática, através do conhecimento científico, uma vez que, a existência de falhas no sistema se faz necessário um entendimento da natureza do risco e daquilo que é tido como aceitável comprometerá como já foi dito anteriormente, as pessoas, a missão da empresa nos aspectos sociais e ambientais;

prevenção de falhas: tem a finalidade a prevenção da integridade do sistema em si e de toda área e pessoal envolvidos. Dá-se importância ao treinamento, pois todos os funcionários da empresa e/ou que nela prestam serviços devem ser treinados objetivando a eficácia das operações. Deve-se ter o controle de gerenciamento das mudanças quanto a planta, instalações, procedimentos e manter um planejamento de emergência;

análise de decisão: caracteriza-se por entender o sistema em si, envolvendo o conhecimento sobre o processo, bem como do ambiente físico, econômico, social e político no qual o sistema está inserido. De certa forma, esta análise de decisão ajuda o decisor a entender melhor o problema e objetivos tendo como resultante a tomar melhores decisões. Este entendimento inclui três (03) critérios, a saber: a) identificar e quantificar as alternativas, b) selecionar o tipo de análise e c) estruturar a análise;

decisão: nesta etapa o decisor determinará a melhor solução desenvolvida na análise de decisão. Em outras palavras, o decisor buscará obter os melhores resultados e com isto diminuir ou neutralizar a probabilidade de surpresas desagradáveis decorrente da ocorrência de eventos indesejáveis.

A figura 4.1 demonstra uma forma sequencial das sete (7) etapas do modelo de gerenciamento de riscos de incêndios e explosões propostos neste trabalho.



Figura 4.1 – Etapas de Gerenciamento de Riscos de Incêndios/Explosões

Porém, o objetivo com a implantação do modelo de gerenciamento de riscos é facilitar o estudo do fenômeno físico de explosão no transformador de potência utilizado pelo setor elétrico e os impactos decorrentes das ondas de choque resultante da explosão, uma vez que os transformadores possuem a maior carga de incêndio em uma subestação, como já foi dito anteriormente, como também, determinar critérios para melhores decisões na ocorrência de explosão ou incêndio para que cause menos ou nenhum dano ou prejuízo às pessoas, propriedade e sistemas ou ainda que sejam atenuados ou que não se materializem.



5 PROPOSIÇÃO PARA MEDIDAS MITIGADORAS DOS EFEITOS DAS ONDAS DE BLAST

Nos transformadores de potência estão contidas as maiores quantidades de materiais combustíveis existente em uma subestação do setor elétrico.

Em virtude de se analisar os riscos da explosão de transformadores de potência de 100 MVA situados em subestação do setor elétrico, buscando desenvolver os cálculos das pressões de ondas de choque, pressões estas, resultantes de gases gerados por falhas elétricas dos transformadores. Falhas estas, oriundas muitas vezes da operação normal dos transformadores, conduzindo à formação de gases os quais são altamente solúveis ao óleo mineral usado no mesmo, gerando com isto, gases diversos, principalmente o acetileno, etilenos, dióxido de carbono, hidrogênio, metano, dentre outros. Eventualmente quando esses gases atingirem os seus respectivos limites de inflamabilidade ou detonabilidade, uma explosão seguida de incêndio poderá acontecer.

Esses gases gerados por vários fatores, como foi mencionado no Capítulo 2, podem inclusive, alcançar determinada concentração, resultando em explosão e incêndio.

Propõe-se primeiramente um modelo de gerenciamento de riscos, desenvolvendo principalmente a etapa de "Análise de Desempenho" e "Nível de Análise", uma vez que se determina o impacto decorrente da explosão do transformador e o que ficará comprometido, ou seja, como se comportará uma subestação após uma explosão do mesmo.

Os danos causados pelas ondas de choque resultante da explosão citados no Capítulo 3, são enormes e os efeitos produzidos pelas ondas de *blast*, e arremesso de fragmentos, de certa forma, são devastadoras, produzindo em alguns casos, danos severos no transformador em si, nas estruturas adjacentes e para todo o sistema elétrico de modo geral.

Diante do exposto, não havendo até o momento, um total controle das falhas dos transformadores, uma vez que são gerados com o funcionamento normal dos mesmos, não pode-se garantir em 100% que uma explosão não ocorra, apesar de inúmeros procedimentos e proteções utilizados pelas empresas do setor elétrico para que a explosão não ocorra. Busca-se diminuir ou neutralizar a probabilidade de surpresas indesejáveis decorrente de eventos desagradáveis e dispendiosos como é a explosão.

Como medida mitigadora propõem-se em função dos valores de pressões geradas pelas ondas de choque oriundas das explosões e associando-se às pressões atmosféricas em que as estruturas em alvenaria e concreto podem suportar, sugere-se a construção de paredes

estruturais adjacentes ao transformador de potência submetidas às pressões atmosféricas e distâncias estabelecidas, como mostra a figura 5.1.

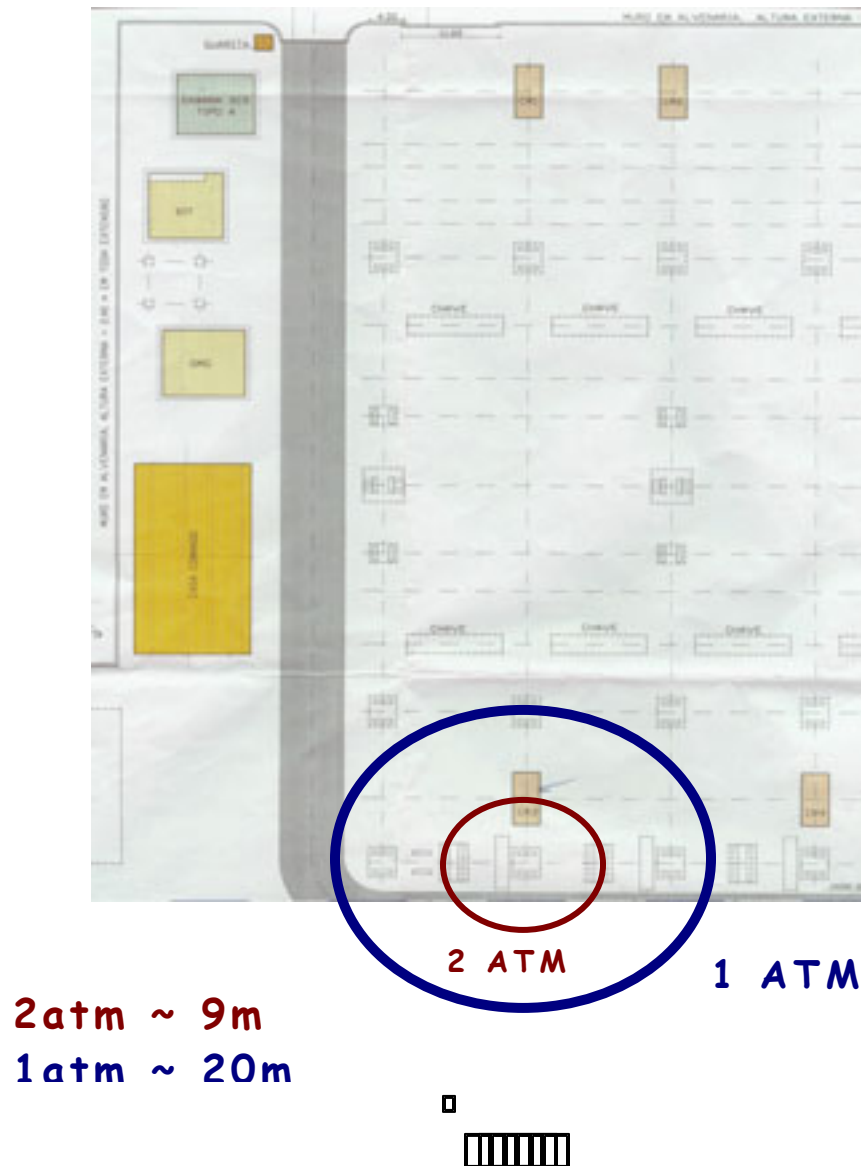


Figura 5.1 – Barreiras utilizadas na construção de paredes submetidas às pressões atmosféricas e respectivas distâncias

As estruturas localizadas a uma distância radial de 9m, são submetidas a uma pressão de duas (2) atmosferas no caso de ocorrência de uma explosão de um transformador enquanto que a vinte (20) metros esta pressão decai para a metade (1atm). Em outras palavras, determina-se a construção de parede de alvenaria/concreto que suporte uma pressão igual ou superior a duas (2atm), objetivando redução e/ou neutralização dos danos materiais e sociais (figura 5.1).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Numa subestação, o transformador de potência possui a maior quantidade de material combustível. Em função disto, necessita-se de um modelo de gerenciamento de riscos, buscando desenvolver uma metodologia para determinação do nível de análise e análise de desempenho de engenharia dos riscos de explosão em transformadores de potência utilizados pelo setor elétrico.

O modelo matemático usado foi o equivalente ao TNT e baseia-se na quantificação de risco de uma possível explosão do transformador examinando o processo como o óleo libera energia e como a energia liberada interage com o meio.

Os efeitos de uma explosão são a formação das ondas de choque frontal provocando os colapsos parcial ou total das estruturas circunvizinhas. Para isto foi calculada a pressão das ondas de choque decorrente das falhas elétricas. E dimensionado os danos estruturais causados por estas pressões resultantes da explosão.

Determinação de barreiras submetidas às pressões atmosféricas, estabelecendo-se suas respectivas distâncias. Distâncias estas recomendadas pela Factory Mutual e NFPA 850, objetivando a neutralização dos danos a propriedade e nos aspectos sociais.

Como recomendações para futuros trabalhos, sugere-se a avaliação do desempenho das estruturas adjacentes ao transformador, através do método de elementos finitos, como também, que se faça os cálculos das pressões de ondas de *blast* decorrentes de explosões originadas pelos gases de forma simultânea. Esta avaliação poderá ser feita a partir dos resultados obtidos neste trabalho.

Espera-se que este trabalho venha de certa forma contribuir para a formação de uma visão conceitual de explosão de transformadores no setor elétrico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. T. de; SOUZA, F. M. C. de (org.) **Produção e competitividade: aplicações e inovações**. Ed. Universitária da UFPE. Recife: 2000. 367p.

AMERICAN Institute of Chemical Engineers. Center Chemical Process Safety. **Guidelines for evaluating process plant buildings for external explosions and fires**. New York. 177p.

ANEEL vai multar Ligth em R\$ 2 milhões e Cerj em R\$ 800 mil. **O Globo on Plantão**. Brasília. 10 fev.1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR: 5356, Transformadores de potência**. Brasil, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR: 5416. Aplicação de cargas em transformadores de potência**. Brasil, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR: 6023 Normas ABNT sobre referências bibliográficas**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR: 6029 Normas sobre apresentação de livros**. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR: 7036. Recebimento, instalação e manutenção de transformadores de potência para distribuição, imersos em líquidos isolantes**. Brasil, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR: 7037. Recebimento, instalação e manutenção de transformadores de potência em óleo isolante mineral**. Brasil, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR: 7274. Interpretação de análise dos gases de transformadores em serviço**. Brasil, 1982

ASSOCIATION ANSI/NFPA 30. **Flamable and Combustible Liquid Code**. National Fire Protection. Boston: USA, 1993.

BERTA, R.; PEIXOTO, R. Explosão deixa ruas de Ipanema às escuras. **Jornal O Globo**. 2000.

CENTER Chemical Process Safety. **Guidelines for hazard evaluation the characteristics of vapor cloud explosions**. Flash and BLEVEs New York: 1994.

CIGRÉ WG 12-05. **An international survey on failures in large transformers in service**. Paris: Electra, número 88, 1983.

CROSBY, W. A. **Drilling and blasting in open pits and quarries**. In: International drilling, blasting and explosives technology course. Ouro Preto: 1998. p. 1-54.

DIETRICH, W.et.al., CIGRÉ Working Group 05. An International Survey on Failure in Large Power Transformers in Service, ELECTRA, nº 88/1983.

DUARTE, D. **Incêndio em transformadores**. Relatório dos Riscos de Incêndio da subestação de Mirueira, Companhia Hidroelétrica do São Francisco, Pernambuco, Brasil, 1999.

EXPLOÇÃO na Mooca foi provocada por transformador de energia elétrica. **Cotidiano Online**. São Paulo. 11 jul. 2000.

FACTORY MUTUAL LOSS PREVENTION DATA SHEET 5-4/14-8. **Transformer**. Factory Mutual research Corporation, Norwood, MA, 1986.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Normas de apresentação tabular. 3.** ed. Rio de Janeiro: 1993. 62p.

GCOI/CDE, Comissão de Desempenho de Equipamento e Instalação. **Relatório Técnico. Análise Estatística de desempenho Transformadores**. 1994,1995,1996.

GRIFFIN, P.J. **Monitoring the integrity of cellulose insulation in order to determine power transformer life**. Annual international conference of double cliente, 1991

HAMMONS, T. J. et al. **Future trends in energy-efficient transformers**. IEEE Power Engineering Review, 1998, volume 18, número 17.

HENRYCH, Josef. **The dynamics of explosion and its use**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amesterdam: 1979

IEEE, Standard 493 (1997). **Report on reliability survey of industrial plants**. Part I: Reliability of electrical equipment. Appendix A

IEEE, Standard 493 (1997). **Report on reliability survey of industrial plants**. Part III: Causes and Types of Failures of Electrical Equipment, the Methods of Repair, and the Urgency of Repair. Appendix A

LEFÉVRE, M. A P.; SILVEIRA, J. R. da Um estudo sobre blackouts. **Eletricidade Moderna**. 1996

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos, v.2. 1993.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 7 ed. Rio de Janeiro, Globo, 1987.

MARTORELI, S. **Novas tecnologias de manutenção. Manutenção em transformadores**. Recife: 2000. 7f.

MENDES, René. **Patologia do trabalho**. Rio de Janeiro: Editora Atheneu, 1997

MYERS, S. D. **Transformer life can be extended** Annual international conference of double cliente, USA, 1982.

MYERS, S. D.; KELLY, J. J.; PANISH, R. H. **A guide to transformer maintenance**. Transformer Maintenance Institute, 1981

NFPA 70. **Transformer and transformer vaults**. National Fire Protection Association,

Quincy, MA, 1990.

NFPA 75. **Standard for the protection of electronic computer/Data.** 1995.

NFPA 850. **Recommended practice for fire protection for fossil fueled steam and combustion turbine electric.** National Fire Protection Association Quincy, MA, 1990.

OLIVEIRA, J. C. de; COGO, R.J; ABREU, J.P.G. de **Transformadores: teoria e ensaios.** São Paulo, Edgard Blucher Ltda, 1984.

PENA, M. C. M. **Falhas em transformadores de potência: Análise, definições, causas e soluções.** Dissertação (Mestrado) Escola Federal de Engenharia de Itajubá) Itajubá: em preparação. 76 f.

SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO. **Normas regulamentadoras (NR).** Portaria nº 3.214/1978, Brasil, 2000.

SERGI **Prevenção da explosão de do incêndio de transformadores.** Referencia :ed4Sc03p. 1999. 28p.

SILVA, M. do S. L. da. **Incêndio em transformadores de potência: Um modelo matemático de incêndios em um transformador.** Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Recife: 1999.57 f.

SIMONE, Gilio Aluísio. **Transformadores.** Teoria e exercícios. São Paulo: Editora Érica, 1998. 312p

SM CONTROLE DE QUALIDADE LTDA. **Análise de gases dissolvidos em óleo isolante.** Recife: 2000. 1p.

SM CONTROLE DE QUALIDADE LTDA. **Análise físico-química de óleo isolante.** Recife: 2000. 1p.

TORNADO causa destruição e deixa feridos em Miami. **O Estado de São Paulo,** São Paulo. 13 maio 1997.

UNITED STATE OF AMERICA. **Explosives and demolitions.** Field manual 5-25. (Departament of the Army). Washington: 1967. 186 p.

VALKENBURGH, V., NOOGER & NEVILLE, INC. **Eletricidade básica.** Rio de Janeiro, Livro técnico, 1982, v. 4.

ZABETAKIS, M. **Flammability characteristics of combustible gases and vapor.** Bulletin 627. Bureau of Mines, Department of Interior. Washington, USA. 1965.