UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

SAD SANDRINI BORSOI

**Coordenação de Dispositivos de Proteção Contra
Surto em Baixa Tensão – Ênfase Instalações
Nucleares**

SÃO PAULO

2018

SAD SANDRINI BORSOI

**Coordenação de Dispositivos de Proteção Contra
Surto em Baixa Tensão – Ênfase Instalações
Nucleares**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio França Sartori

SÃO PAULO

2018

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação-na-publicação

Borsoi, Sad

Coordenação de Dispositivos de Proteção Contra Surtos em Baixa Tensão - Ênfase Instalações Nucleares / S. Borsoi -- versão corr. -- São Paulo, 2018. 111 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Compatibilidade Eletromagnética 2.Coordenação de Dispositivos de Proteção Contra Surtos 3.Descargas Atmosféricas 4.Requisitos de Segurança em Instalações Nucleares I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Resumo

BORSOI, Sad Sandrini. **Coordenação de Dispositivos de Proteção Contra Surtos em Baixa Tensão – Ênfase Instalações Nucleares**. 111 f. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2018.

O trabalho apresenta uma metodologia aplicável à coordenação de dispositivos de proteção contra surtos em sistemas de corrente alternada de baixa tensão. Esta tem como base a adequação dos níveis de isolamento e imunidade dos equipamentos elétricos e eletrônicos e de energia absorvida pelos dispositivos de proteção. A principal motivação está relacionada aos critérios de segurança e confiabilidade requeridos por instalações nucleares, em que a coordenação da proteção contra surtos assume um importante papel. Uma metodologia interativa é implementada visando otimizar o processo de análise e especificação dos dispositivos de proteção, considerando a adoção de métodos analíticos e numéricos. Modelos de equipamentos elétricos e eletrônicos, quando submetidos a surtos de tensão e corrente, além dos dispositivos de proteção contra surtos, são implementados no simulador de transitórios eletromagnéticos - ATP. Destacam-se nestes estudos, as análises de configurações e arranjos do sistema elétrico, assim como seus parâmetros, a influência destes na configuração ou arranjo ótimo dos dispositivos de proteção, além do atendimento aos requisitos das normas aplicáveis.

Palavras-chave: Dispositivo de proteção contra surtos em baixa tensão, coordenação de proteção contra surtos, instalação nuclear e requisitos de segurança.

Abstract

BORSOI, Sad Sandrini. **Low-Voltage Surge Protective Device Coordination - Emphasis Nuclear Facilities**. 111 s. Master thesis, Polytechnic School, University of São Paulo, 2018.

The work presents a methodology regarding to low-voltage surge protective device coordination. This is based on adequacy of the isolation and immunity level of electrical and electronic equipment and the energy absorbed by the protective devices. The main motivation is related to the required nuclear plant reliability and safety criteria, in whose the surge protection coordination can assume an important role. An interactive methodology is carried out to optimize the analysis and the protection device specification, considering the adoption of analytical and numerical methods. Electrical and electronic equipment models, when submitted to voltage and current surges, in addition to surge protective devices, are implemented in the electromagnetic transient simulator - ATP. In these studies, the analysis of electrical system configurations and arrangements, as well as their parameters, and their influence on the configuration or optimum protective device arrangement, besides compliance with the requirements of applicable standards are highlighted.

Keywords: Low-voltage protective device, surge protection coordination, nuclear facilities and safety requirements.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Fontes de danos a uma estrutura devido a descargas atmosféricas.....	24
Figura 2 - Exemplo básico de distribuição de corrente da descarga atmosférica.....	25
Figura 3 - Impulso com curta duração.....	25
Figura 4 - Impulso com longa duração.....	26
Figura 5 - Possíveis componentes da descarga atmosférica descendente	26
Figura 6 - Onda combinada, tensão de circuito aberto.....	27
Figura 7- Onda Combinada, corrente de curto circuito.....	28
Figura 8 - Onda 10/350 μ s.....	29
Figura 9 - Zonas de proteção	31
Figura 10 - Fluxograma de critérios para seleção de um sistema coordenado de SPD.....	38
Figura 11 - Curva característica de um MOV	41
Figura 12 - Modelo do varistor.....	42
Figura 13 - Modelo de varistor tipo “Leaded”	43
Figura 14 - Modelo de varistor tipo “Block”.....	43
Figura 15 - Modelo de LT	44
Figura 16 - Circuitos equivalentes: (a) videocassete, (b) conjunto de som, (c) computador, (d) monitor de vídeo e (e) televisor.....	46
Figura 17 - Modelo de transformadores para descargas atmosféricas indiretas.....	47
Figura 18 - Fluxograma funcional de critérios para seleção de um sistema coordenado de SPD	51
Figura 19 - Fluxograma de processo computacional para implementação e análise do método	54
Figura 20 - Modelo empregado para uma instalação residencial	57
Figura 21 - Corrente de surto e corrente drenada pelas proteções para o caso 2.....	59
Figura 22 - Tensão sobre os terminais das proteções para o caso 2	60
Figura 23 - Energia absorvida pelas proteções para o caso 2.....	60
Figura 24 - Circuito básico de coordenação de SPD em cascata.....	61
Figura 25 - Impedância de entrada de um monitor de vídeo	61
Figura 26 - Curva Característica (V x I) dos SPD S20K150 e S20K250.....	62

Figura 27 - Energia absorvida pelas proteções – relação Alto-Alto.....	63
Figura 28 - Máxima corrente drenada pelas proteções - relação Alto-Alto	64
Figura 29 - Máxima tensão de grampeamento das proteções - relação Alto-Alto	64
Figura 30 - Energia absorvida pelas proteções – relação Alto-Baixo	65
Figura 31 - Máxima corrente drenada pelas proteções – relação Alto-Baixo	65
Figura 32 - Máxima tensão de grampeamento das proteções – relação Alto-Baixo	66
Figura 33 - Energia absorvida pelas proteções – relação Baixo-Alto	67
Figura 34 - Máxima corrente drenada pelas proteções – relação Baixo-Alto	67
Figura 35 - Máxima tensão de grampeamento das proteções – relação Baixo-Alto	67
Figura 36 - Energia absorvida pelas proteções – relação Baixo-Baixo.....	68
Figura 37 - Máxima corrente drenada pelas proteções – relação Baixo-Baixo.....	69
Figura 38 - Máxima tensão de grampeamento das proteções – relação Baixo-Baixo.....	69
Figura 39 - Corrente de surto e corrente drenada pelas proteções – 3 m	71
Figura 40 - Tensão nos terminais das proteções – 3 m.....	71
Figura 41 - Energia absorvida pelas proteções – 3 m.....	71
Figura 42 - Corrente de surto e corrente drenada pelas proteções –120 m	72
Figura 43 - Tensão nos terminais das proteções – 120 m.....	72
Figura 44 - Energia absorvida pelas proteções – 120 m.....	73
Figura 45 - Diagrama unifilar típico de uma usina nuclear de geração de energia	75
Figura 46 - Sistema elétrico simulado a ser protegido	77
Figura 47 - Curva Característica (V x I) dos dispositivos instalados nos painéis alimentadores	82
Figura 48 - Curva Característica (V x I) dos dispositivos instalados como supressores de surto	82
Figura 49 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis – NPP007.....	84
Figura 50 - Corrente e energia absorvida pela proteção do CBT – NPP019 – P02.....	85
Figura 51 - Corrente e energia absorvida pelas proteções do CBT e CCM – NPP030 – P02..	85
Figura 52 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis – NPP048 – P02	87
Figura 53 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis – NPP050 – P02	87
Figura 54 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis e o painel alimentador – NPP077 – P03	88
Figura 55 - Relevância para as configurações NPP083-NPP102.....	91
Figura 56 - Curva Característica (V x I) dos novos dispositivos instalados no CBT e CCM ..	91

Figura 57 - Relevância global dos padrões de proteção – etapa 2.....	93
Figura 58 - Relevância dos padrões de proteção para NPP053-NPP072 e NPP083-NPP102 ..	94
Figura 59 - Corrente e energia absorvida pelas proteções do CBT e CCM – NPP057 – P02..	95
Figura 60 - Tensão sobre o CBT, CCM e motores – NPP057 – P02	95
Figura 61 - Tensão sobre o primário e secundário do TRF – NPP057 – P02	96
Figura 62 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis e o painel alimentador – NPP057 – P02	96
Figura 63 - Corrente e energia absorvida pela proteção do QD – NPP087 – P02.....	97
Figura 64 - Corrente e energia absorvida pelas proteções dos equipamentos sensíveis – NPP087 – P02.....	97
Figura 65 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis e o painel alimentador – NPP087 – P02	97
Figura 66 - Tensão sobre o primário e secundário do TRF – NPP087 – P02	98
Figura 67 - Tensão sobre o CBT, CCM e motores – NPP087 – P02	98
Figura 68 - Biblioteca dos cabos de alimentação	106
Figura 69 - Biblioteca dos equipamentos sensíveis.....	106
Figura 70 - Biblioteca de transformadores	107
Figura 71 - Biblioteca de SPD – modelo “Leaded”.....	107
Figura 72 - Biblioteca de SPD – modelo “Block”.....	108

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros da descarga atmosférica para uma usina nuclear.....	30
Tabela 2 - Níveis e valores preferenciais de ensaio.....	35
Tabela 3 - Níveis de suportabilidade de isolamento dos equipamentos	36
Tabela 4 - Parâmetros do modelo do transformador	48
Tabela 5 - Parâmetros dos varistores	57
Tabela 6 - Configuração dos SPD	58
Tabela 7 - Comparação entre os resultados do autor e do modelo proposto	58
Tabela 8 - Principais características de operação das proteções	62
Tabela 9 - Configurações adotadas para as análises.....	62
Tabela 10 - Análise qualitativa do desempenho das proteções	70
Tabela 11 - Reatores em operação e em construção no Brasil	74
Tabela 12 - Característica dos cabos de alimentação	78
Tabela 13 - Zonas de proteção e níveis de surto.....	79
Tabela 14 - Nível básico de isolamento e imunidade dos equipamentos	80
Tabela 15 - Conjuntos de proteções que serão aplicados no sistema	80
Tabela 16 - Principais características de operação das proteções	81
Tabela 17 - Resumo simulações e resultados – etapa 1.....	90
Tabela 18 - Principais características de operação dos novos dispositivos.....	92
Tabela 19 - Resumo simulações e resultados – etapa 2.....	92

Lista de Siglas

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEM	Interferência Eletromagnética
I&C	Instrumentação e Controle
LEMP	<i>Lightning Electromagnetic Pulses</i>
LER	<i>License Event Report</i>
LPZ	<i>Lightning Protection Zone</i>
LT	Linha de Transmissão
MOV	<i>Metal Oxide Varistor</i>
NBI	Nível Básico de Isolamento
NP	Nível de Proteção
NPP	<i>Nuclear Power Plant</i>
NRC	<i>Regulatory Nuclear Commission</i>
ORNL	<i>Oak Ridge National Laboratory</i>
SPD	<i>Surge Protection Device</i>
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
U.S. NRC	<i>U.S. Nuclear Regulatory Commission</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Visão Geral.....	11
1.2	Estrutura do Texto	14
2	REVISÃO LITERÁRIA	15
2.1	Estado da Arte	15
2.2	Guias, Normas e Relatórios.....	18
3	METODOLOGIA	23
3.1	Fundamentos Teóricos	23
3.1.1	Causas dos Surtos	23
3.1.2	Componentes das Descargas Atmosféricas	25
3.1.3	Classificação do Nível de Proteção da Instalação	30
3.1.4	Classificação das Zonas de Proteção	30
3.1.5	Níveis de Surtos em Sistemas de Baixa Tensão	32
3.1.6	Definição do Nível de Imunidade e de Isolamento dos Equipamentos.....	32
3.1.7	Considerações sobre os tipos de SPD.....	36
3.1.8	Critérios para Seleção de um Sistema Coordenado de SPD	37
3.2	Modelo de Componentes Elétricos.....	38
3.2.1	Modelo dos Dispositivos de Proteção contra Surtos	38
3.2.2	Modelo de Linhas de Transmissão	44
3.2.3	Modelo de Cargas Elétricas.....	45
3.3	Método de Cálculo dos Parâmetros do Surto Drenado pelo SPD	48
3.4	Método Proposto	50
4	APLICAÇÕES.....	56
4.1	Configuração Típica de Rede em Instalações	56

4.1.1	Descritivo	56
4.1.2	Implementação e Análises	57
4.2	Efeito do Elemento Desacoplador e da Tensão de Grampeamento entre SPD	61
4.2.1	Descritivo	61
4.2.2	Análises	63
4.3	Coordenação de SPD em Instalações Nucleares	73
4.3.1	Introdução.....	73
4.3.2	Localidade de Instalações Nucleares no Brasil	74
4.3.3	Sistema Elétrico Típico de uma Usina Nuclear.....	75
4.3.4	Aplicação do Método Proposto	76
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
5.1	Conclusão	99
5.2	Trabalhos futuros.....	100
	REFERÊNCIAS	101
	ANEXO A.....	106
	ANEXO B.....	109

Capítulo 1

Introdução

1.1 Visão Geral

A crescente utilização de equipamentos elétricos e eletrônicos apresenta como uma das características baixos níveis de imunidade, quando comparados com os ambientes resultantes de fenômenos eletromagnéticos.

Por outro lado, menciona-se que os sistemas elétricos e eletrônicos, tais como os sistemas em baixa tensão, requerem a continuidade de operação e segurança adequadas às instalações afins.

Entre os fenômenos eletromagnéticos de elevada intensidade apontam-se aqueles decorrentes de surtos de tensão e de corrente. Estes são oriundos, principalmente, de descarga atmosférica e chaveamento de cargas elétricas [1].

As características destes surtos, tais como elevadas amplitudes, taxas de variação, e probabilidade de ocorrência, são tais que podem apresentar como resultados operações inadequadas de sistemas e equipamentos elétricos e danos irreversíveis a este, decorrentes, por exemplo, da perda de isolamento [2].

No caso das descargas atmosféricas, nota-se que estas podem ser de dois tipos: descargas diretas ou indiretas, cujos efeitos são decorrentes dos acoplamentos de campos elétricos e magnéticos. Desta forma, os estudos de compatibilidade eletromagnética visando adequar os níveis de imunidade dos sistemas elétricos aos ambientes eletromagnéticos resultantes destes fenômenos, assumem grande importância.

Em particular, ressaltam-se o desenvolvimento destes em instalações nucleares. Nestas os equipamentos e sistemas relacionados à segurança das plantas, além de serem, qualificados e protegidos visando atender suas funções de continuidade de operação, devem atender aos

critérios de desligamento seguro da planta. Assim, os estudos de compatibilidade eletromagnética dos sistemas de instrumentação e controle (I&C), de suprimento de energia, e sistemas relacionados devem ser considerados desde as etapas de concepção destas instalações.

Recentemente, o aumento dos custos de manutenção, juntamente com a falta de peças de reposição para sistemas de I&C, que não são mais suportados pelo fabricante original, estão levando a uma maior utilização de equipamentos digitais de I&C em plantas nucleares de potência (do inglês NPP). Como peças de reposição de sistemas analógicos tornam-se cada vez mais indisponíveis e sistemas digitais demonstram ser cada vez mais flexíveis, mais sistemas digitais de I&C serão instalados nas atuais gerações de centrais nucleares [3].

Nota-se, no entanto, que a digitalização das plantas químicas e nucleares atuais, face às características dos sistemas digitais, quando comparados com os analógicos, resultaram em diversos eventos de interferências eletromagnéticas, ressaltando a importância dos estudos de compatibilidade eletromagnética, adequação de requisitos técnicos e metodologias de avaliações de riscos, atualização de normas, etc.

Estudos experimentais de investigação do potencial de vulnerabilidade de sistemas de segurança avançados devido à interferência eletromagnética (IEM), em conjunto com estudos reportados de eventos que ocorreram em NPP que são atribuídas a IEM, confirmam a importância da avaliação destes eventos. A fim de ilustrar estes aspectos anteriormente mencionados, relata-se que o *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) tem se engajado no desenvolvimento de recomendações técnicas e guias visando a compatibilidade eletromagnética (CEM) em sistemas de I&C em NPP. Assim, diversos estudos têm sido desenvolvidos envolvendo a identificação e aplicação de práticas de engenharia para minimizar o impacto de IEM nas diversas atividades relacionadas à indústria nuclear [3].

No que tange os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), estes são projetados para prevenir e minimizar danos diretos e indiretos às estruturas atingidas por descargas atmosféricas. Recentemente, um significativo número de eventos resultantes de descargas atmosféricas em NPP tem sido relatado [4, 5].

Nota-se que uma NPP possui inúmeras estruturas, sistemas e componentes que são susceptíveis a descargas atmosféricas. Ressaltam-se, assim, os efeitos danosos resultantes de descargas atmosféricas, que podem incluir o desligamento inadvertido do reator, atuação dos sistemas de segurança e perda da proteção contra incêndio.

Observa-se que orientações específicas são necessárias para atender os requisitos de projeto e a implementação de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em plantas nucleares [4, 5]. Entre estas recomendações, enfatiza-se a aplicação de dispositivos de proteção contra surtos, já que apenas os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas externos não garantem uma proteção adequada do sistema elétrico da instalação.

Diversas normas internacionais e nacionais recomendam o estudo de coordenação de dispositivos de proteção contra surtos (do inglês SPD). A fim de ilustrar estas recomendações por organismos relacionados à área nuclear, relatam-se aquelas contidas nos guias da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), tais como as descritas no guia específico de Projeto de Sistemas Elétricos de Plantas Nucleares de Potência [6]. Menciona-se que estas recomendações relacionadas à aplicação de dispositivos de proteção contra surtos em instalações nucleares são de caráter obrigatório.

Informações relacionadas a eventos que, direta ou indiretamente afetam a operação das plantas nucleares, tais como os resultantes de surtos, são analisadas e mantidas em documentos específicos elaborados por diversas organizações, sendo aplicáveis na consideração de adequações dos projetos das plantas nucleares. Entre as principais fontes de informações, citam-se [7]:

- *Incident Report System (IRS)*, que agrega as informações de eventos ocorridos em plantas de diversos países, tendo como responsáveis pela manutenção deste banco de dados a OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*) e a AIEA;
- *World Association Nuclear Operators (WANO)*, que disponibiliza as informações dos operadores de plantas nucleares; e
- *License Event Report (LER) da U.S. Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC)* coletada pela experiência de operação em plantas dos EUA.

Diante do importante papel que a utilização de SPD assume nos projetos de instalações elétricas, inclusive nos sistemas de baixa tensão, este trabalho realiza considerações sobre a aplicação destes dispositivos em sistemas elétricos de corrente alternada de baixa tensão em instalações nucleares e propõe uma metodologia para análise e especificação das proteções contra surtos.

1.2 Estrutura do Texto

Este trabalho está organizado em 5 capítulos e 2 anexos. Uma introdução com a problemática e as principais questões sobre a aplicação de SPD são apresentadas neste capítulo.

O capítulo 2 apresenta uma revisão literária dos trabalhos realizados na área, destacando a evolução da utilização dos protetores contra surtos em baixa tensão e o estado da arte, assim como os guias, normas e relatórios que orientam e normatizam a utilização destes dispositivos.

O capítulo 3 apresenta a metodologia de trabalho, abordando os fundamentos teóricos básicos, os modelos dos componentes elétricos utilizados e o método de cálculo matemático dos parâmetros do surto, assim o método para coordenação de SPD em sistemas de baixa tensão.

No capítulo 4 são apresentadas as simulações e os resultados. Primeiramente, são analisados alguns estudos de casos sobre a aplicação e a coordenação das proteções contra surtos, em um caso específico, foi realizado a comparação dos resultados obtidos em [18] e os resultados obtidos com a utilização dos modelos de SPD implementados no ATP, sendo desta forma, um parâmetro para validação do modelo de protetores utilizado neste trabalho. Por fim, são realizadas simulações, aplicando-se o método proposto em um trecho típico de um sistema elétrico de uma NPP.

O capítulo 5 destaca as principais contribuições deste trabalho e as conclusões sobre o mesmo. Ainda neste capítulo, há a apresentação de sugestões para continuidade do trabalho.

Por fim, as referências bibliográficas e os anexos são apresentados na parte final desta dissertação.

Capítulo 2

Revisão Literária

2.1 Estado da Arte

A aplicação de dispositivos protetores contra surtos tem sido objeto de estudos desde o início do século 20 [8]. Nestes, observa-se que a utilização de SPD em sistemas de baixa tensão foi muitas vezes negligenciada, face a pequena ocorrência de eventos registrados, resumindo-se à aplicação de protetores nos quadros de entrada das instalações, com ênfase na proteção dos medidores de energia. Menciona-se a utilização de centelhadores a ar ou *spark gaps*. Por outro lado, a preocupação com proteções dos circuitos primários dos transformadores, circuitos em média e altas tensões, já era evidenciada na literatura científica da época.

Nota-se, no entanto, que a partir da segunda metade do século 20, há um crescimento das aplicações de SPD em circuitos em baixa tensão, e de publicações científicas visando estabelecer métodos de definição de dispositivos e arranjos adequados para a proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos [9].

De fato, diante da crescente substituição de equipamentos analógicos por digitais, e da consequente utilização de equipamentos elétricos e eletrônicos que apresentam como características baixos níveis de imunidade, perante a presença de fenômenos correspondentes a eventos ríspidos nos ambientes eletromagnéticos, a preocupação com a ocorrência de interferência eletromagnética passa a ser considerada como fator primordial. Assim, metodologias de controle de IEM nos projetos de sistemas elétricos e eletrônicos passam a ser consideradas de uma forma mais cuidadosa desde a segunda metade do século 20. Dentre estas ressaltam-se as decorrentes de surtos.

Na década de 60, destaca-se o trabalho de Liao e Lee [10], que aborda as características dos surtos devido a chaveamentos de cargas elétricas e descargas atmosféricas,

e dos dispositivos de proteção contra surtos, tais como, centelhadores, resistores não lineares de carbono silício e diodos de avalanche. As características requeridas de um SPD para operar em corrente contínua (CC), também, são apresentadas.

No final da década de 70, Martzloff apresentou diversos trabalhos sobre medidas de proteção contra surtos em sistemas de corrente alternada (CA) em baixa tensão. Estes trabalhos tiveram como principal motivação a análise da elevada incidência de falhas em equipamentos de sistemas de comunicação, provocado por transientes de sobretensões.

De forma bastante abrangente, em [11] são descritos os aspectos referentes à origem dos surtos em sistemas elétricos de baixa tensão; características dos surtos, tais como formas de onda e intensidades, as normas internacionais e metodologias aplicáveis, os tipos e características dos dispositivos de proteção, etc. Dentre os aspectos anteriormente mencionados, enfatizam-se aqueles referentes a norma da IEEE que trazia, de forma pioneira, um guia para testes de suportabilidade à surtos (IEEE std 472-1974); e a metodologia de proteção por zonas com as respectivas características das formas de onda associadas. Com relação aos SPD, destacava-se a aplicação de varistores de óxido metálico (do inglês MOV), que representava a mais nova tecnologia em dispositivos de proteção contra surtos daquela época. Uma análise de coordenação de dispositivos de proteção contra surtos de resultados experimentais, também foi apresentada.

Na década de 80, o desenvolvimento destes estudos se intensifica, e pode-se perceber uma literatura científica bastante ampla. Alguns trabalhos podem ser destacados, em que, além da influência das formas de onda, tais como as oscilatórias, as características dos condutores, ponto de injeção dos surtos e a atenuação destes são considerados [12, 13].

Avaliações do desempenho dos dispositivos, decorrentes de efeitos térmicos e eventuais falhas são apresentadas, por exemplo, por Matzloff e Leddy em [14].

No que tange à modelagem matemática das formas de onda, a contribuição de Standler [15], destaca-se. Neste, as formas de ondas utilizadas para a representação de surtos de tensão e corrente pelas normas (1,2/50 μ s, 8/20 μ s e 10/350 μ s) são detalhadas.

Observa-se, assim, a importância destes trabalhos para o melhor entendimento de alguns parâmetros considerados relevantes para o adequado dimensionamento e coordenação dos SPD, além daqueles relativos aos efeitos relacionados ao fenômeno de “envelhecimento”.

Na década de 90, a aplicação de simuladores computacionais, tais como os simuladores de circuitos, na avaliação de arranjos de SPD intensificam-se [16-18].

Inicialmente, os trabalhos apresentam configurações simplificadas dos circuitos de alimentação ou de interligação dos SPD e dos equipamentos a serem protegidos, adotando-se apenas a resistência como parâmetro das linhas, negligenciando-se, assim, as indutâncias e capacitâncias [16].

Considerações de modelos mais completos de linhas de transmissão são apresentadas em trabalhos posteriores [17, 18]. Assim, diversas instalações são analisadas, e aspectos referentes à influência dos parâmetros e modelos de linhas de transmissão são avaliados, ressaltando-se, por exemplo, a importância da consideração do modelo com perdas na correta avaliação dos SPD, em particular na correta avaliação da energia absorvida por estes, e nos componentes de acoplamento [17].

Com relação ao tipo de instalação, destaca-se, por exemplo, Standler que utilizou o simulador PSpice na coordenação de SPD, avaliando-se diversas configurações destes em uma instalação tipicamente residencial [18]. Já a importância da aplicação de protetores contra surtos no secundário de transformadores de distribuição, e sua correta coordenação com o protetor do primário é enfatizada por Marz e Mandis [19].

Lai e Matzloff realizaram diversos trabalhos ressaltando-se as simulações computacionais e experimentos de bancada, que mostram o efeito do comprimento e parâmetros das linhas dos circuitos, formas de onda do surto, etc., na distribuição da energia do surto entre os SPD [20].

Menciona-se, também, Rousseau e Perche, que realizaram análises computacionais sobre o efeito da indutância dos cabos alimentadores sobre a coordenação de SPD [21]. Alerta-se sobre a dificuldade da realização destes estudos, e a busca de dados precisos dos SPD, tais como a tolerância máxima e mínima, bem como a relevância das impedâncias dos cabos utilizados nas conexões dos sistemas de aterramento.

Desde o fim da década de 90 até os dias atuais, os conceitos de CEM ganharam ainda mais destaque com a evolução dos sistemas eletrônicos, que possuem circuitos cada vez menores e mais sensíveis. É evidente que os sistemas modernos são muito mais versáteis, entretanto o desafio de obter sistemas confiáveis e imunes a surtos inerentes ao ambiente de operação vem alavancando os estudos nesta área. Vários autores vêm se destacando neste período, dentre eles podemos ressaltar:

- Paul, que destaca as diversas características dos sistemas CC e CA, além da aplicação adequada de SPD, e apresenta uma metodologia para a especificação de SPD em sistemas CC [22]. Os aspectos referentes à coordenação de energia são enfatizados, já que os protetores em CC devem ser capazes de interromper surtos, que não são cíclicos e que não passam pelo zero [22]; e
- Li, Yuan e Zhao, que apresentam análises computacionais de coordenação de SPD, verificando, além da influência de parâmetros como a impedância do circuito e seu comprimento, a influência dos diferentes tipos de carga (resistivo, indutivo e capacitivo) [23].

Trabalhos semelhantes foram realizados por Sreten e Vladan em [1, 24, 25], com a aplicação dos softwares ATP e MATLAB, em que são consideradas diferentes formas de onda de surtos padronizadas. São enfatizadas a influência das cargas capacitivas e o aparecimento de comportamentos oscilatórios. Ressalta-se que estas características capacitivas são aquelas relacionadas aos conversores estáticos, bastante utilizados atualmente.

Evidencia-se, desta forma, a importância dos estudos de coordenação de SPD nas instalações atuais.

2.2 Guias, Normas e Relatórios

As normas internacionais atuais, além de serem classificadas de acordo com as instalações e aplicações específicas, apresentam a consideração de avaliações de desempenho de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos com base no ambiente eletromagnético resultante de uma ampla gama de fenômenos eletromagnéticos [26]. Assim, apontam-se diversos fenômenos eletromagnéticos, tais como:

- Campos magnéticos devido a chaveamentos de linhas de transmissão;
- Campos magnéticos devido a curto-circuito;
- Campos magnéticos devido às descargas atmosféricas;
- Quedas de tensão bruscas, interrupções e variações de tensão em circuitos de baixa tensão;
- Sobreensões devido a descargas atmosféricas e chaveamentos; e

- Transientes rápidos, etc.

Quanto à classificação das normas relacionadas às aplicações e sistemas específicos, mencionam-se aquelas aplicáveis a equipamentos para uso industrial, científico e médico (do inglês ISM); equipamentos de informática (do inglês ITE); veículos automotores; navios; sistemas I&C de processos industriais; sistemas I&C relacionados à segurança de instalações nucleares; sistemas de geração; transmissão e distribuição de energia elétrica; equipamentos de uso residencial; normas militares; entre outras.

Nota-se, assim, a importância e necessidade atual da avaliação de compatibilidade eletromagnética, e a grande variedade de normas, visando estabelecer os requisitos necessários a adequada operação e segurança dos equipamentos e sistemas.

Entre os órgãos reguladores, podemos citar as organizações militares, representadas pelas normas militares MIL-STD, os órgãos civis, tais como a FCC (*Federal Communication Commission*), o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), a IEC (*International Electrotechnical Commission*), ISO (*International Organization for Standardization*), U.S.NRC (*United States Nuclear Regulatory Commission*), etc.

No caso particular das recomendações relativas ao fenômeno de descargas atmosféricas, destacam-se as normas da IEC, no qual a IEC 61000-4-5 [27] e IEC 61000-4-12 [28] aplicam-se a testes de imunidade a surtos conduzidos oriundos de descargas atmosféricas e chaveamentos, enquanto que a IEC 61000-4-9 [29] aplica-se a testes de imunidade a campos magnéticos decorrentes de descargas atmosféricas, denominados LEMP (*Lightning Electromagnetic Pulses*).

Com relação à metodologia de proteção de instalações e sistemas, a IEC 62305 [30-33] aborda estes aspectos, de uma forma bastante abrangente, em quatro partes:

- IEC 62305-1: *General Principles*;
- IEC 62305-2: *Risk Management*;
- IEC 62305-3: *Physical Damage to Structures and life Hazard*; e
- IEC 62305-4: *Electrical and Electronic Systems within Structures*.

A definição de zonas de proteção é apresentada constituindo-se a base da metodologia de proteção de estruturas e equipamentos elétricos e eletrônicos. A consideração de descargas diretas e indiretas, representadas pelas características dos impulsos eletromagnéticos e

intensidades e formas de ondas associadas, assim como critérios aplicáveis à seleção de SPD, são apresentados.

Os tópicos específicos relacionados aos princípios de seleção, operação, localização e coordenação de SPD para circuitos de potência CA e CC são apresentados na IEC 61643-12 [34].

Outro conjunto de normas similares são as IEEE C62.41.1 [2], IEEE C62.41.2 [35] e IEEE C62-45 [36]. Assim como nas normas da IEC, este conjunto de normas apresenta as definições de surtos envolvidos em sistemas elétricos de baixa tensão, de forma detalhada, as características das formas de onda de impulsos eletromagnéticos e as recomendações práticas de testes de surtos para equipamentos conectados a sistemas elétricos de baixa tensão.

O folheto técnico CIGRE 550 [37] realiza uma abordagem bastante ampla sobre proteção contra descargas atmosféricas de sistemas em baixa tensão, trazendo diversas discussões técnicas, análises do comportamento de equipamentos e sistemas, além de métodos práticos para se obter a proteção dos sistemas de baixa tensão contra surtos provocados por descargas atmosféricas.

A norma brasileira NBR 5410 [38] recomenda o uso de dispositivos de proteção contra surtos de tensão e está ligada às formas de instalação de SPD, aos níveis de proteção dos equipamentos, às tensões de alimentação e ao tipo de aterramento do sistema elétrico.

Observa-se que a norma NBR 5419 [39-42], que estabelece os requisitos de proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, sofreu uma grande revisão em 2015, tendo como base a IEC-62305 [30-33].

Com relação às normas e recomendações aplicáveis às instalações nucleares, ressalta-se a abrangência do RG 1.180 [43], inicialmente elaborada como um guia geral de CEM, que traz recomendações práticas de projeto e instalação dos equipamentos para limitar o impacto dos efeitos eletromagnéticos, além de testes para avaliar a emissão e imunidade de equipamentos, incluindo-se os de imunidade a surtos. Este guia tem como base as recomendações das normas americanas civis (IEEE) e militares (MIL-STD) e as normas europeias (IEC).

Normas específicas podem ser mencionadas ressaltando-se a importância deste tema na área nuclear. O NUREG/CR-6866 [4] trata especificamente das bases de projeto para sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em instalações nucleares, já o

NUREG/CR-5609 [26] trata de recomendações sobre IEM conduzidas em linhas de sinais e de I&C relativas a sistemas de segurança.

Nota-se que análises de eventos resultantes de descargas atmosféricas são apresentadas em relatórios de licenciamento de instalações nucleares (LER – *License Event Reports*), que precedem a elaboração do NUREG/CR-6866 [4].

Considerando o período total de análise dos eventos provocados por descargas atmosféricas, 1980-2003, destaca-se que foram registrados 240 casos que resultaram em operações indevidas e danos a equipamentos em instalações nucleares. A fim de ilustrar os principais eventos registrados, podem-se citar [4]:

- 62 eventos de perda do Sistema Elétrico Externo, sem nenhum dano a equipamento;
- 01 evento de perda do Sistema Elétrico Externo, acompanhado de danos a equipamentos;
- 76 eventos de *trip*¹ no reator (desligamento inadvertido), sem danos a equipamentos;
- 11 eventos de transientes de afundamento de tensão;
- 22 eventos de atuação da proteção de sobretensões do sistema em corrente continua das barras de controle dos reatores;
- 9 eventos com perda do sistema de proteção contra incêndio;
- 4 eventos com incêndio;
- 19 eventos de danos aos equipamentos meteorológicos; e
- 36 eventos com danos a equipamentos diversos.

Um caso específico reportado a U.S.NRC merece destaque [4]. Este teve início quando uma descarga atmosférica atingiu o pátio de manobras da subestação da planta de YANKEE NUCLEAR POWER STATION, ROWE, MASSACHUSETTS, em 15 de junho de 1991. A usina operava a 89% da sua potência máxima quando foi atingida pela descarga atmosférica. O evento foi iniciado pela perda do sistema elétrico externo, com incêndio no transformador e perda do sistema de comunicação. Na sequência, ocorreu o desligamento da turbina e automaticamente o *trip*¹ do reator (queda por gravidade das barras de controle do

¹ Terminologia genérica utilizada para indicar o desligamento seguro do reator.

reator). Em seguida, outras descargas atingiram a planta no sistema de distribuição de energia da usina, causando a interrupção de diversos outros sistemas, tendo início um incêndio.

Os transformadores da estação de serviço estavam equipados com um SPD de óxido-metálico por fase no primário. A ORNL concluiu que não existiam SPD nos painéis elétricos da entrada de serviço, nem tampouco os barramentos do sistema de distribuição interno eram protegidos por SPD, e que dispositivos de proteção contra surtos internos poderiam ter prevenido os efeitos das sobretensões, tais como: rompimentos de fusíveis, disparos de disjuntores, e a interrupção de circuitos supridos pelos inversores estáticos do sistema relacionado à segurança da planta [4].

Diversos outros eventos estão descritos no site da U.S.NRC, assim como o evento ocorrido em 16 de agosto de 2010 na unidade II da planta de NORTH ANNA POWER STATION, VIRGINIA, que resultou em um *trip*¹ automático do reator, devido a uma falsa sinalização de sobretensão decorrente dos efeitos resultantes de descargas atmosféricas. Além da atuação do sistema de proteção do reator, o evento ocasionou a atuação do sistema de alimentação de água auxiliar [44].

Em todos os eventos reportados, a saúde e a segurança do público não foram afetadas, entretanto, tais eventos, mesmo sem ocasionarem danos aos equipamentos, trazem prejuízos econômicos para a usina devido ao stress ocasionado aos sistemas de segurança, que entram em operação indevidamente, devido à má operação de alguns componentes. Além deste fato, após o desligamento inadvertido do reator a usina deve cumprir várias etapas de segurança que devem ser reportadas à U.S.NRC, podendo, desta forma, permanecer por várias horas fora de operação.

Motivado por aspectos relacionados à importância de se adotar medidas necessárias à correta operação e segurança das instalações nucleares, em particular, quando da ocorrência de eventos resultantes de surtos atmosféricos, este trabalho propõe apresentar uma metodologia aplicável à coordenação de SPD nestas.

¹ Terminologia genérica utilizada para indicar o desligamento seguro do reator.

Capítulo 3

Metodologia

A especificação e implementação de proteções adequadas é muito importante, já que a utilização indevida de dispositivos de proteção contra surtos pode desencadear diversas falhas ou danos aos sistemas e equipamentos elétricos. Recomenda-se que a seleção de dispositivos de proteção seja realizada considerando-se diversos parâmetros, tais como as formas de onda dos surtos, a magnitude, a energia associada, frequência de ocorrência e origem destes, características dos dispositivos de proteção e níveis de imunidade ou isolamento dos equipamentos [20, 22, 45].

Diante da importância dos fatos expostos, este capítulo apresenta os conceitos teóricos relativos às descargas atmosféricas, surtos envolvidos, nível de imunidade dos equipamentos, dispositivos de proteção contra surtos e critérios para seleção de um sistema de proteção coordenado. Em seguida, são apresentados os modelos de componentes elétricos que serão utilizados na implementação do sistema proposto. Também, são expostos os métodos de cálculo dos parâmetros do surto conduzido pelo dispositivo de proteção. E por último, é mostrado o método aplicado no desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Fundamentos Teóricos

3.1.1 Causas dos Surtos

A presença de fenômenos eletromagnéticos com valores de intensidade superiores aos de imunidade de equipamentos elétricos e eletrônicos, podem gerar eventos de IEM nestas instalações. Entre os fenômenos considerados como fontes severas de IEM, estão as descargas atmosféricas e os pulsos de chaveamento dos circuitos do sistema elétrico de potência. Um terceiro fenômeno que necessita de reconhecimento ocorre devido a surtos resultantes de

interações entre diferentes sistemas, tais como sistemas de potência e de comunicação, durante transitórios que ocorrem em um dos sistemas [2, 35, 36].

Especificamente neste trabalho, iremos concentrar nossos esforços nos surtos de tensão e corrente provocados por descargas atmosféricas que são oriundos de [30, 39]:

- a) S1 - Descargas atmosféricas diretas na estrutura: Surtos de corrente fluem pelo sistema de proteção contra descargas atmosféricas, sistema de aterramento e partes metálicas aterradas, podendo induzir surtos de tensão por acoplamento eletromagnético nos circuito da instalação ou até mesmo utilizar os próprios circuitos como meio de retorno de parte da corrente que foi drenada pelo sistema de aterramento;
- b) S2 – Descargas atmosféricas próximas à estrutura: Surtos podem ocorrer devido ao acoplamento do campo eletromagnético gerado pela descarga atmosférica com condutores externos e internos à instalação;
- c) S3 – Descargas atmosféricas diretas nas linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura: Surtos adentram a instalação pelo próprio circuito de energia ou pelo sistema de aterramento; e
- d) S4 – Descargas atmosféricas próximas às linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura: Surtos podem ocorrer devido ao acoplamento do campo eletromagnético gerado pela descarga atmosférica com as linhas elétricas e tubulações metálicas externas, introduzindo surtos nos circuitos de energia e no sistema de aterramento da instalação.

Na Figura 1 são exemplificadas as possíveis fontes de surto provocadas por descargas atmosféricas que podem provocar danos a uma instalação, de acordo com a classificação acima (S1 a S4).

Fonte: IEC 62305-1 [30].

Na pior situação, quando uma descarga atmosférica atinge diretamente a estrutura da instalação, toda a corrente e o campo eletromagnético correspondente estarão presentes. Caso

nenhum cálculo específico da divisão de corrente seja realizado, uma suposição geral é que 50% desta corrente é conduzida para o subsistema de aterramento e os outros 50% retornam por meio dos SPD para o circuito elétrico trifásico com neutro (ver Figura 2). Vale ressaltar, que a suposição mencionada da distribuição de corrente da descarga atmosférica, é apenas uma forma de simplificar as análises, estando tal distribuição fortemente influenciada pelas práticas de aterramento [33, 42].

Figura 2 - Exemplo básico de distribuição de corrente da descarga atmosférica

Fonte: IEC 62305-4 [33].

3.1.2 Componentes das Descargas Atmosféricas

As correntes de descargas atmosféricas consistem em um ou mais componentes diferentes [30]:

- Impulso com duração inferior a 2 ms; e
- Componentes longas com duração superior a 2 ms.

Figura 3 - Impulso com curta duração

Fonte: IEC 62305-1 [30].

Legenda:

I – Corrente de pico;

T1 – Tempo de frente; e

T2 – Tempo até meio valor.

Figura 4 - Impulso com longa duração

Fonte: IEC 62305-1 [30].

Legenda:

T – Tempo de duração; e

Q_1 – Carga da componente longa de descarga atmosférica.

Uma diferenciação complementar das componentes das descargas atmosféricas provém de suas polaridades (positiva ou negativa) e de suas posições durante as descargas atmosféricas (primeira componente, componente subsequente e superposta). Na Figura 5 é mostrado um caso típico de descarga atmosférica do tipo descendente (nuvem para terra) e suas possíveis componentes envolvidas.

Figura 5 - Possíveis componentes da descarga atmosférica descendente

Fonte: IEC 62305-1 [30].

3.1.2.1 Formas de Onda Normalizadas

Existe uma grande variedade de formas de onda de surtos eletromagnéticos propostas na literatura, que são usadas para testes de imunidade e suportabilidade de equipamentos a

surtos. Especificamente, a IEC 61000-4-5 [27] e a IEEE C62.41.2 [35] utilizam as mesmas formas de onda dos surtos propostos nos testes, com procedimentos muito similares.

As formas de onda indicadas em “a” e “b” merecem destaque para surtos provocados por descargas atmosféricas.

a) Onda Combinada (1,2/50 μ s - 8/20 μ s)

A onda combinada é entregue por um gerador que pode aplicar uma onda de tensão de 1,2/50 μ s através dos terminais de um circuito aberto e uma onda de corrente de 8/20 μ s através dos terminais curto circuitados. A forma de onda exata que é entregue é determinada pelo gerador e a impedância para o qual o surto é aplicado. A forma de onda de tensão de circuito aberto é mostrada na Figura 6, enquanto que a forma de onda de corrente de curto circuito é mostrada na Figura 7 [15, 27, 35, 36].

Figura 6 - Onda combinada, tensão de circuito aberto

Fonte: IEEE C62.45 [36].

Forma de onda da tensão de circuito aberto:

- Tempo de frente: 1,2 μ s; e
- Tempo até meio valor: 50 μ s.

A equação (3-1) representa a modelagem matemática da forma de onda 1,2/50 μ s [36]:

$$V(t) = AV_p \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \right) \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) \quad (3-1)$$

Onde:

$$\tau_1 = 0,4074 \mu\text{s};$$

$$\tau_2 = 68,22 \mu\text{s};$$

$$A = 1,037;$$

V_p = Valor de pico da tensão de circuito aberto; e

t = tempo.

Figura 7- Onda Combinada, corrente de curto circuito

Fonte: IEEE C62.45 [36].

Forma de onda da corrente de curto circuito:

- Tempo de frente: 8 μs ; e
- Tempo até meio valor: 20 μs .

A equação (3-2) representa a modelagem matemática da forma de onda 8/20 μs [36]:

$$I(t) = AI_p t^3 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (3-2)$$

Onde:

$$\tau = 3,911 \mu\text{s};$$

$$A = 0,01243 (\mu\text{s})^{-3};$$

I_p = Valor de pico da corrente de curto circuito; e

t = tempo.

b) Onda 10/350 μs

Dispositivos de proteção contra surtos instalados nos painéis de entrada das instalações, submetidos a descargas atmosféricas que possam atingir diretamente a estrutura

da instalação ou a rede elétrica, estão sujeitos a estresses severos. Devido a esta razão, [46] definiu entre as classes de testes aplicáveis a SPD conectados a sistemas de distribuição de baixa tensão, a classe 1 envolvendo altos níveis de energia. A forma de onda de corrente 10/350 μ s, conforme mostra a Figura 8, é sugerida para testar os parâmetros dos SPD classe 1.

Fonte: IEEE C62.45 [36].

Forma de onda da corrente de curto circuito:

- Tempo de frente: 10 μ s; e
- Tempo até meio valor: 350 μ s.

A equação (3-3) representa a modelagem matemática da forma de onda 10/350 μ s [36]:

$$I(t) = AI_p \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \right) \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) \quad (3-3)$$

Onde:

$\tau_1 = 4,103 \mu$ s;

$\tau_2 = 470,1 \mu$ s;

$A = 1,051$;

I_p = Valor de pico da corrente de curto-circuito; e

t = tempo.

3.1.3 Classificação do Nível de Proteção da Instalação

As normas NBR 5419-1 [39] e IEC 62305-1 [30] consideram quatro níveis de proteção (NP) contra descargas atmosféricas (I a IV). Para cada NP, é fixado um conjunto de parâmetros mínimos que é utilizado para projetar os componentes contra descargas atmosféricas (por exemplo, seção transversal dos condutores, espessuras das chapas metálicas, capacidade de condução de correntes dos SPD, etc.). As instalações nucleares devem atender ao NP I, devido aos danos envolvidos decorrentes de descargas atmosféricas que venham atingir a instalação. É sugerido por [39] e [30], que se considere os parâmetros máximos para a descarga atmosférica (primeiro impulso positivo) que venham atingir a instalação, indicados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros da descarga atmosférica para uma usina nuclear

Parâmetros da Corrente (Primeiro Impulso Positivo)	NP I
Corrente de Pico (I)	200 kA
Energia Específica (W/R)	10 MJ/ Ω
Parâmetro de Tempo ($T1/T2$)	10/350 μ s

Fonte: NBR 5419-1 [39].

3.1.4 Classificação das Zonas de Proteção

As Normas [30, 39] apresentam critérios para proteção de equipamentos em edificações, dividindo-as em regiões ou zonas de proteção com diferentes níveis de IEM. As medidas de proteção como SPDA, blindagem de condutores, blindagens e SPD determinam as zonas de proteção contra descargas atmosféricas (do inglês LPZ).

As LPZ a jusante de uma medida de proteção são caracterizadas por uma redução significativa dos LEMP, em comparação com a LPZ a montante.

Desta forma, estabelecem-se LPZ que são caracterizadas pelas condições eletromagnéticas dentro dos seus limites. Cada zona corresponde um nível de energia, o que permite coordenar as proteções, e definir se os equipamentos elétricos e eletrônicos na zona em que estão instalados estão adequadamente protegidos [47].

A respeito da ameaça de descarga atmosférica, as seguintes LPZ são definidas [30, 39, 47]:

- LPZ 0A: *Zonas sujeitas a descargas atmosféricas diretas*. Portanto, toda a corrente e o campo eletromagnético correspondente estão presentes. Os dispositivos de

proteção são considerados sujeitos a surtos de corrente com a forma de onda 10/350 μ s;

- LPZ 0B: *Zonas que não estão sujeitas a descargas atmosféricas diretas*, mas há a influência direta do campo eletromagnético não atenuado. Na definição dos dispositivos de proteção consideram-se surtos de corrente com a forma de onda 8/20 μ s; e
- LPZ 1: *Zonas não sujeitas a descargas atmosféricas diretas*, cujas correntes nos condutores existentes são reduzidas, se comparadas com a zona LPZ 0B. Nessa zona o campo eletromagnético pode ser atenuado por meio de blindagem. A análise de desempenho dos dispositivos de proteção nesta e nas zonas subsequentes consideram surtos de corrente com a forma de onda 8/20 μ s.

Se a redução adicional da corrente nos condutores e/ou do campo eletromagnético é requerida, zonas subsequentes (LPZ 2, etc.) devem ser criadas.

Figura 9 - Zonas de proteção

Fonte: Sartori [47].

A forma de onda do surto relacionada a cada zona está vinculada a probabilidade de ocorrência do tipo de dano para a instalação, como exemplo, pode ser considerada a forma de onda 10/350 μ s para a zona LPZ 1, onde se assume a possibilidade de ocorrência de danos tipo S1 (descarga atmosférica diretas na estrutura) e S3 (descargas atmosféricas sobre linhas que entram na estrutura).

Realizando um comparativo entre a IEC 62305-1 [30], NBR 5419-1 [39] e IEE C62.42.1 [2], verifica-se que a norma americana (IEEE) realiza uma categorização de zonas de proteção um pouco diferente da norma europeia (IEC) e brasileira (NBR), contudo resolveu-se adotar a categorização utilizada nas normas brasileira e europeia.

3.1.5 Níveis de Surtos em Sistemas de Baixa Tensão

As referências [30, 39] relacionam os níveis máximos dos surtos nas LPZ1 e zonas subsequentes em sistemas elétricos de baixa tensão, com as possíveis fontes de danos envolvidas (S1, S2, S3 e S4). Para o NP I contra descargas atmosféricas, as quais as instalações nucleares devem atender, temos os seguintes níveis de surtos para os sistemas elétricos de baixa tensão.

- a) S1 - Descargas atmosféricas na estrutura: 8/20 μ s – 10 kA;
- b) S2 - Descargas atmosféricas perto da estrutura: 8/20 μ s – 0,2 kA;
- c) S3 - Descargas atmosféricas diretas na linha: 10/350 μ s – 10 kA; e
- d) S4 - Descargas atmosféricas indiretas na linha: 8/20 μ s – 5 kA.

Os valores apresentados pelas normas tratam de valores referenciais, que tomam como base uma determinada configuração de roteamento dos cabos dos circuitos dentro de estruturas não blindadas. Dependendo da configuração adotada estes valores podem sofrer alterações.

3.1.6 Definição do Nível de Imunidade e de Isolamento dos Equipamentos

A escolha de um equipamento a ser instalado em um determinado ambiente eletromagnético deve levar em consideração dois parâmetros: o nível de imunidade e a suportabilidade de isolamento. Assim, os transientes eletromagnéticos previstos para um determinado ambiente devem estar sempre abaixo dos níveis de imunidade ou de isolamento do equipamento instalado.

3.1.6.1 Nível de Imunidade

A série IEC 61000 define métodos de ensaios e níveis de severidade para avaliação do comportamento operacional de equipamentos submetidos a diversos tipos de distúrbios eletromagnéticos.

Especificamente, a norma IEC 61000-4-5 [27] trata da imunidade a surtos causados por chaveamentos e descargas atmosféricas. Observa-se, que o referido tratamento de imunidade não se refere a ensaios de suportabilidade de isolamento dos equipamentos a impulsos de alta tensão e, sim, a seu comportamento operacional, quando submetidos a surtos. Assim, a norma apresenta métodos de ensaio e níveis de imunidade, restando aos usuários e/ou fabricantes de equipamentos a responsabilidade de escolha dos níveis de imunidade adequados [47].

Definidas as formas de onda, definem-se, então, os níveis de tensão preferenciais de ensaio de imunidade dos equipamentos conforme Tabela 2. Esses níveis são selecionados de acordo com as classes de instalações elétricas, apresentadas a seguir [27]:

1) Classe 0

Ambiente elétrico bem protegido, normalmente, constitui-se de uma "sala especial".

Todos os cabos apresentam proteção contra sobretensões (primária e secundária); os equipamentos eletrônicos estão interconectados a um sistema de aterramento que não é influenciado, significativamente, pelo sistema de energia ou descarga atmosférica, e os equipamentos possuem fonte de alimentação dedicada. Considera-se que, neste ambiente, os surtos de tensão não podem exceder 25 V.

2) Classe 1

Ambiente elétrico parcialmente protegido.

Os cabos de entrada são providos de proteção contra sobretensões (primária); os equipamentos eletrônicos são bem conectados a um sistema de aterramento que não é influenciado, significativamente, pela instalação de energia ou descargas atmosféricas. Equipamentos eletrônicos têm suas fontes de alimentação completamente separadas de outros equipamentos. Surtos não podem exceder 500 V.

3) Classe 2

Ambiente elétrico onde os cabos estão bem separados mesmo em pequenos trechos.

A instalação é aterrada de tal forma que pode estar sujeita a interferências geradas pela instalação propriamente dita ou por descargas atmosféricas. A fonte de alimentação para os equipamentos eletrônicos é separada de outros circuitos, basicamente, utilizando-se um transformador especial. Circuitos não protegidos estão na instalação, mas, separados e em número limitado. Surtos não podem exceder 1 kV.

4) Classe 3

Ambiente elétrico onde cabos de energia e sinal caminham em paralelo.

A instalação é conectada ao sistema de aterramento da rede de energia e pode estar sujeita a interferências geradas pela instalação ou por descargas atmosféricas, correntes de curto-circuito e chaveamentos. A rede de energia pode estar sujeita a sobretensões relativamente altas. Equipamentos eletrônicos protegidos e equipamentos elétricos menos sensíveis a interferências estão conectados à mesma rede de energia. Cargas indutivas estão presentes na instalação. Surtos não podem exceder 2 kV.

5) Classe 4

Ambiente elétrico onde os cabos de energia são externos e são utilizados pelos circuitos elétricos e eletrônicos.

A instalação é conectada ao sistema de aterramento da rede de energia e pode estar sujeita as interferências geradas pela instalação ou por descargas atmosféricas, correntes de curto-circuito (na faixa de alguns kA) e chaveamentos. A rede de energia pode estar sujeita a sobretensões relativamente altas e pode ser a mesma para os equipamentos elétricos e eletrônicos. Um caso deste ambiente é quando um equipamento eletrônico é conectado à rede de telecomunicações dentro de uma área densamente povoada. Não há uma rede de aterramento sistematicamente construída. Surtos não podem exceder 4 kV.

6) Classe 5

Ambiente elétrico para equipamentos eletrônicos conectados a cabos de telecomunicações e linhas aéreas de energia em uma área não densamente povoada.

Todos esses cabos estão providos de proteção contra sobretensões (primária). Não há sistema de aterramento externamente ao equipamento eletrônico. Os requisitos desta classe são cobertos pela classe 4.

7) Classe X

Condições especiais especificadas nas especificações do produto.

Tabela 2 - Níveis e valores preferenciais de ensaio

Classe	Nível de tensão de ensaio em circuito aberto kV ($\pm 10\%$)	
	Tensão de linha	Tensão de fase
0	NA	NA
1	NA	0,5
2	0,5	1,0
3	1,0	2,0
4	2,0	4,0
5	2,0	4,0

Fonte: IEC 61000-4-5 [27].

Os testes nos equipamentos são realizados com as seguintes formas de onda:

- Classes 1 a 4: 1,2/50 μ s (8/20 μ s);
- Classe 5: 1,2/50 μ s (8/20 μ s) para circuitos de energia e linhas/circuitos de sinais que percorrem curtas distancias; e
- Classe 1 a 5: 10/700 μ s (5/320 μ s) para linhas de comunicação simétricas.

Os equipamentos ligados à rede pública devem ser ensaiados para os níveis de tensão da classe 2.

3.1.6.2 Nível de Suportabilidade de Isolamento

A norma IEC 60664-1 [48] define métodos de ensaios e os níveis de severidade para avaliação da suportabilidade de isolamento dos equipamentos pertencentes aos sistemas de baixa tensão quando submetidos a impulsos de tensão. A suportabilidade de isolamento dos equipamentos é tipicamente definida pelos fabricantes pelo termo Nível Básico de Isolamento (NBI), ou seja, o nível de tensão de impulso que o equipamento suporta. Geralmente, nos testes de NBI dos equipamentos é utilizada a tensão de impulso normatizada 1,2/50 μ s. A Tabela 3 mostra os níveis de suportabilidade de isolamento dos equipamentos para diferentes níveis de tensão de sistema.

Tabela 3 - Níveis de suportabilidade de isolamento dos equipamentos

Tensão nominal do sistema (V)		Tensão de isolamento (V)			
3 Fases	1 Fase	Categoria de sobretensão			
		I	II	III	IV
	120-240	800	1500	2500	4000
230/400	277/480	1500	2500	4000	6000
	400/690	2500	4000	6000	8000
	1000	4000	6000	8000	12000

Fonte: 60664-1 [48].

As categorias de tensão dos equipamentos são definidas da seguinte forma:

- Categoria I - trata de equipamentos alimentados por circuitos no qual medidas para limitar os transientes de sobretensão são tomadas;
- Categoria II - equipamentos supridos por instalações fixas tais como aparelhos, equipamentos portáteis e outras cargas domésticas;
- Categoria III - equipamentos supridos por instalações fixas onde a confiabilidade e disponibilidade estão sujeitas a requisitos especiais, tais como os equipamentos industriais; e
- Categoria IV – equipamentos utilizados na origem da instalação, tais como equipamentos de medição e proteção.

3.1.7 Considerações sobre os tipos de SPD

Os SPD recebem praticamente duas classificações:

- 1) Em relação sua localização

Basicamente, os protetores podem ser classificados em duas categorias: Os protetores de corrente de descarga (para-raios), que conduzem um percentual significativo das correntes parciais da descarga atmosférica, que são utilizados na interface entre as zonas 0 e 1, e os protetores de sobretensão (supressores de surto), que atuam na condução dos distúrbios conduzidos devido às descargas atmosféricas na interface entre as zonas 1 e 2, assim como os distúrbios decorrentes de chaveamentos elétricos que ocorram nas demais interfaces a partir da zona 1 [47].

- 2) Em relação sua capacidade de suportabilidade ao surto

Os SPD são classificados de acordo com a IEC 61643-11 [46] para sistemas de energia, e de acordo com a IEC 61643-21 [49] para sistemas de sinais. Os SPD recebem uma categorização de classe de acordo com o teste de capacidade de suportabilidade ao surto a que são submetidos:

- a) Classe I - são ensaiados com forma de onda de corrente típica 10/350 μ s;
- b) Classe II - são ensaiados com forma de corrente onda típica 8/20 μ s; e
- c) Classe III - são ensaiados com a onda combinada 8/20 μ s (1,2/50 μ s).

3.1.8 Critérios para Seleção de um Sistema Coordenado de SPD

Primeiramente, devem-se classificar as zonas de proteção, os possíveis tipos e níveis de surtos esperados para aquela instalação, conforme NBR 5419-1 [39] e IEC 62305-1 [30].

Em segundo lugar, deve-se conhecer o nível de imunidade ou suportabilidade de isolamento dos equipamentos que integram o sistema. Conforme abordado no item 3.1.6, os níveis de imunidade dos equipamentos elétrico-eletrônicos são cobertos pela IEC 61000-4-5 [27] e os de suportabilidade de isolamento pela IEC 60664-1 [48].

Em seguida, deve-se realizar a escolha adequada da classe do SPD a ser empregado. Esta escolha leva em consideração a probabilidade de ocorrência dos tipos de surtos envolvidos nos ambientes. Devem-se definir os parâmetros dos SPD, conforme IEC 61643-11 [46], tais como: capacidade de absorção de energia; corrente máxima suportável; tensão de operação; e tensão de grampeamento. A escolha dos parâmetros dos SPD deve ser realizada perante as seguintes análises:

- 1) A tensão de operação do SPD deve ser superior a tensão nominal do sistema elétrico;
- 2) A máxima corrente suportável pelo SPD deve ser superior ao valor de pico da corrente de surto esperada para aquele ambiente;
- 3) A máxima tensão de grampeamento que aparece nos terminais do SPD deve ser inferior ao nível de tensão de imunidade ou isolamento do equipamento; e
- 4) Se os itens 1, 2 e 3 forem atendidos os dispositivos podem ser selecionados.

O último critério a ser considerado é a definição do arranjo das proteções para coordenação de energia dos SPD instalados em cascata, conforme diretrizes da IEC 61643-12 [28] para sistemas de energia. O valor da energia do surto absorvida pelos dispositivos deve estar abaixo da capacidade máxima de absorção destes.

Sistematizando, o fluxograma mostrado na Figura 10 representa os passos e as normas de referência que devem ser adotados para a realização de um adequado projeto de coordenação de dispositivos de proteção contra surtos. Do lado esquerdo estão representados os parâmetros que devem ser considerados e do lado direito as respectivas normas associadas.

Figura 10 - Fluxograma de critérios para seleção de um sistema coordenado de SPD

3.2 Modelo de Componentes Elétricos

3.2.1 Modelo dos Dispositivos de Proteção contra Surtos

Diversos dispositivos podem ser considerados nos arranjos dos sistemas de proteção contra surtos, de acordo com as necessidades específicas relacionadas aos níveis de proteção requeridos e características operacionais dos equipamentos e sistemas elétricos. Neste trabalho, nos restringiremos a utilização dos varistores de óxido metálico, devido a versatilidade e ampla utilização deste tipo de SPD.

3.2.1.1 Varistores de Óxido Metálico

Os varistores são dispositivos utilizados para proteção contra surtos de tensão, fabricados com uma mistura de material cerâmico e partículas de óxido de zinco ou óxido de magnésio sintetizado. Eles podem ser considerados como uma resistência variável, cujo valor muda de acordo com a tensão aplicada aos terminais, quanto maior a tensão, menor a resistência. De uma maneira geral, as características básicas de um varistor, são as seguintes [22, 45, 50, 51]:

- 1) No sistema elétrico, quando submetido às tensões normais de operação, o dispositivo não deve conduzir. Esta característica está relacionada à presença de uma corrente mínima, denominada corrente de fuga ($< 1 \text{ mA}$);
- 2) Para tensões acima dos limites da tensão de operação do sistema, o dispositivo deve passar a conduzir, sem, no entanto, permitir o aumento considerável da tensão entre seus terminais. Pode-se dizer que o dispositivo “grampeia” a tensão entre seus terminais. Além disso, o dispositivo é projetado para que, nestas condições, “drene” a corrente resultante dos surtos;
- 3) A capacidade de absorção de energia do dispositivo deve ser compatível com os níveis de energia dos surtos esperados no sistema elétrico;
- 4) Assim que o surto for suprimido, o dispositivo deverá retornar ao estado descrito no item 1;
- 5) O dispositivo deve ser adequado para aplicações internas e externas de acordo com o ambiente a que estará exposto, de modo que seu desempenho não seja afetado;
- 6) As tensões residuais restantes devem ser menores que o nível de imunidade do equipamento a ser protegido; e
- 7) O dispositivo deve suportar sobretensões temporárias previstas para a instalação, provocadas por faltas no sistema, sem que ocorra dano ao componente.

Além das características de funcionamento do dispositivo, observam-se ainda alguns parâmetros que são importantes para uma escolha adequada em um sistema de proteção contra surtos [22, 45, 50, 51]:

- 1) Tensão de operação: é uma tensão de referência, utilizada no catálogo dos fabricantes para efeito de classificação dos dispositivos, que indica a tensão CA e

CC de operação contínua do SPD. Este parâmetro deve ser maior que a tensão nominal do sistema a que se aplica o dispositivo;

- 2) Tensão do varistor: é a tensão que aparece nos terminais do varistor quando uma corrente de 1 mA circula através deste;
- 3) Corrente máxima suportável de surto: Valor máximo de corrente que o dispositivo consegue conduzir sem ocorrência de danos materiais ao mesmo. Esta depende das características do surto, duração do impulso, bem como do número de descargas a que o dispositivo já foi submetido;
- 4) Capacidade de absorção de energia: Esta característica está relacionada com a quantidade de energia que o dispositivo pode absorver de maneira segura. Sendo assim, sua capacidade de absorção de energia deve ser compatível com os níveis de energia dos surtos esperados no sistema elétrico em estudo; e
- 5) Tensão de grampeamento (“*clamping*”): Valor de tensão que o dispositivo de proteção fixa entre seus terminais na ocasião de um surto. Cabe ressaltar que este valor está diretamente ligado ao valor da corrente do surto. Este ainda deve ser compatível com o nível de imunidade dos equipamentos a serem protegidos.

Devem-se observar as condições ambientais nas quais o dispositivo irá operar (temperatura, umidade, ambiente agressivo, etc.) e selecionar o que melhor atender às condições impostas.

Com relação ao modelo recomendado para varistores, nota-se que estes apresentam características de resistências não lineares, e podem ser representados de forma simplificada pela curva característica ($V \times I$), mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Curva característica de um MOV

Fonte: *Data book* do fabricante [51].

Sendo:

V_c = Tensão de grampeamento para uma corrente específica I_c .

As características do varistor podem ser descritas através de funções exponenciais, usando a expressão (3-4):

$$I = k \times V^\alpha \quad (3-4)$$

Sendo: $\alpha > 1$

Onde:

I = Corrente drenada no varistor;

V = Tensão aplicada no varistor;

k = Constante do componente (depende da geometria); e

α = Expoente de não linearidade.

Os valores de k e α podem ser obtidos experimentalmente, sendo disponibilizado em catálogos técnicos de fabricantes.

Ressalta-se que esta expressão só é válida para uma determinada faixa de operação do MOV, já que para valores de corrente muito pequenos ou muito grandes, a curva característica do dispositivo não pode ser representada pela expressão anterior. Este modelo

trata de uma aproximação bastante relevante para avaliações analíticas, uma vez que seu tratamento matemático é relativamente simples.

Os modelos dos varistores utilizados nas simulações foram importados do *website* do fabricante [52], estes são modelos mais completos e adequados para análises numéricas. Vale destacar que o fabricante disponibiliza os arquivos do modelo dos varistores em uma biblioteca pronta para ser importada e utilizada pelo simulador de circuitos elétricos PSPICE. Contudo, devido as restrições apresentadas pela versão estudantil deste programa, resolveu-se utilizar apenas o arquivo que apresentava os parâmetros dos varistores e efetuar a modelagem destes no ambiente do ATP.

O modelo do fabricante é representado pela sua curva característica V/I com uma capacitância em paralelo e uma indutância em série. Uma resistência em série é adicionada, $R_S = 100 \mu\Omega$, para prevenir estados não permissíveis caso fontes ideais fossem conectadas em paralelo ou se o modelo do varistor fosse ligado diretamente a uma fonte [51]. A estrutura do circuito equivalente do varistor é mostrada na Figura 12.

Figura 12 - Modelo do varistor

Fonte: arquivo do *website* do fabricante [52].

Onde:

$R_S = 100 \mu\Omega$: resistência em série;

L_S : indutância em série;

C_P : Capacitância em paralelo; e

$V = f(I)$: Curva característica V/I (resistência variável).

As seguintes aproximações são usadas para a descrição matemática do modelo do varistor [51]:

- S20K150:

“S” representa o tipo de projeto do varistor, neste caso tipo “Leaded”;

“20” é o diâmetro do disco do varistor em mm;

“K” é a tolerância da tensão máxima de operação, que vale 10 %; e

“150” é a tensão de operação do varistor.

- B60K680:

“B” representa o tipo de projeto do varistor, neste caso tipo “Block”;

“60” é o diâmetro do disco do varistor em mm;

“K” é a tolerância da tensão máxima de operação, que vale 10 %; e

“680” é a tensão de operação do varistor.

O segundo dado, que é o diâmetro do disco do varistor, está diretamente relacionado a máxima corrente suportável de surto, e conseqüentemente com a capacidade de absorção de energia do MOV.

3.2.2 Modelo de Linhas de Transmissão

Neste trabalho será utilizado o modelo de linhas de transmissão (LT) com perdas para representação dos cabos que alimentam as cargas elétricas, conforme Figura 15.

Figura 15 - Modelo de LT

Fonte: Paul [53].

Onde:

R = Resistência ôhmica (Ω/m);

L = Indutância do meio condutor (H/m);

C = Capacitância do meio condutor (F/m); e

G = Condutância do dielétrico (S/m).

A impedância característica da linha de transmissão (Z_0) depende da geometria dos condutores da linha e das propriedades magnéticas e elétricas do meio circundante. Desconsiderando as perdas, a impedância característica da linha é representada por (3-6), caso as perdas sejam consideradas, esta será representada pela expressão (3-7).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3-6)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3-7)$$

3.2.3 Modelo de Cargas Elétricas

Nas simulações dos sistemas elétricos submetidos a surtos, faz-se necessário a utilização de modelos de cargas elétricas tipicamente utilizadas em plantas industriais, mais especificamente em instalações nucleares, entretanto devido à dificuldade de se encontrar na literatura modelos matemáticos de caracterização de impedância de equipamentos elétricos e eletrônicos, adotou-se para equipamentos sensíveis (baixo nível de imunidade) as cargas elétricas abordadas em [54].

Adicionalmente, serão utilizados modelos de máquinas girantes e transformadores quando submetidos a tensões impulsivas de alta frequência, abordados em [56] e [59], respectivamente.

3.2.3.1 Aproximação dos modelos de cargas sensíveis

Em [54] foi realizada a caracterização da impedância de cargas elétricas residenciais. Os modelos foram desenvolvidos com base em dados experimentais, considerando a frequência máxima de 5 MHz, mostrados na Figura 16.

Os circuitos equivalentes dos equipamentos mostrados na Figura 16, (a) videocassete, (b) conjunto de som, (c) computador, (d) monitor de vídeo e (e) televisor, representam respectivamente, os circuitos dos equipamentos industriais sensíveis X1, X2, X3, X4 e X5 que serão utilizados nas simulações deste trabalho.

Figura 16 - Circuitos equivalentes: (a) videocassete, (b) conjunto de som, (c) computador, (d) monitor de vídeo e (e) televisor

Fonte: Bassi [54].

3.2.3.2 Máquinas Girantes

O enrolamento da máquina girante se comporta como uma LT com impedância de surto relativamente alta, da ordem de 1000Ω . A velocidade de propagação do surto nos enrolamentos do motor é bem menor do que em uma LT, pois L e C são muito maiores. Tipicamente, a velocidade de propagação assume valores por volta de $15\text{-}20 \text{ m}/\mu\text{s}$, isso significa que a maior parte da sobretensão aparecerá na primeira volta do enrolamento para surtos com frentes de onda rápidas [55].

De maneira a simplificar as análises, a máquina girante será vista no sistema elétrico como uma impedância no fim da linha. A impedância de surto ou impedância característica das máquinas variam normalmente de 200Ω a 1000Ω . Na ausência de dados melhores recomenda-se utilizar o valor de impedância de 1000Ω [56], senão assim, será utilizado este valor nas simulações.

3.2.3.3 Transformadores

Entre os modelos dos componentes elétricos, quando submetidos a surtos eletromagnéticos, o transformador assume um papel importante considerando a dificuldade de se obter modelos representativos para abordagens em faixas de frequência que envolvem fenômenos de alta frequência, como os fenômenos provocados por descargas atmosféricas.

Os surtos eletromagnéticos são parcialmente transferidos através do acoplamento eletromagnético, que é o mecanismo que governa a operação do transformador em frequências de potência e depende da relação de transformação dos enrolamentos. Para os surtos eletromagnéticos, os efeitos eletrostáticos dominam o acoplamento de transientes do enrolamento do primário para o secundário. Para surtos de chaveamentos lentos, o efeito do acoplamento eletromagnético predomina [57].

Apesar da simplicidade em sua obtenção, o modelo de transformador tipo PI capacitivo, utilizado por muitos autores em modelagens de transformadores, não representa adequadamente o comportamento do transformador quando da aplicação de surtos [58].

Em [59], o autor modelou transformadores de distribuição trifásicos de diferentes fabricantes e potências nominais quando submetidos a descargas atmosféricas indiretas. A validação do modelo proposto pelo autor foi realizada através da comparação entre simulações computacionais e resultados de ensaios obtidos em laboratório. Na Figura 17 é mostrado o circuito equivalente do modelo dos transformadores de distribuição para descargas atmosféricas indiretas e na Tabela 4 estão representados os parâmetros referentes a cada transformador.

Sendo assim, para este trabalho será considerado o transformador de 225 kVA abordado em [59].

Figura 17 - Modelo de transformadores para descargas atmosféricas indiretas

Fonte: Kanashiro [59].

Tabela 4 - Parâmetros do modelo do transformador

Parâmetros	Potência (kVA)					
	30	225	150	45	75	112,5
R1 (kΩ)	-	60	110	-	-	-
R2 (kΩ)	14	2,5	100	7	20	3
R3 (kΩ)	0,8	4,4	100	3	15	5
R5 (kΩ)	-	0,44	11	-	-	-
R6 (kΩ)	1,1	-	-	0,4	0,35	0,35
R7 (kΩ)	1,62	1,5	0,35	2,8	3	1,5
C1 (pF)	493	750	600	380	480	600
C2 (pF)	94,8	300	-	885	804	1125,76
C3 (pF)	21,51	250	10000	152,79	220,53	146,13
C4 (pF)	50	380	1300	370	600	600
C5 (pF)	-	1500	500	250	300	400
C7 (pF)	957,5	1000	400	800	825,8	850
L2 (mH)	16	35	-	35	35	18
L3 (mH)	1,84	10	0,005	10	15	15
L5 (mH)	-	0,01173	14	-	-	-
L7 (mH)	0,05	0,008271	0,015	0,02	0,015	0,0124

Fonte: Kanashiro [59].

3.3 Método de Cálculo dos Parâmetros do Surto Drenado pelo SPD

A definição dos parâmetros dos surtos é necessária para a definição dos SPD a serem aplicados no sistema. Tais parâmetros seguem estudos realizados em [22,45,50, 51].

A impedância de surto, a velocidade de propagação e o tempo de deslocamento, desconsiderando as perdas do meio condutor, são definidas respectivamente nas expressões (3-8), (3-9) e (3-10). A impedância de surto e a impedância característica da LT são sinônimas.

$$Z_{Surto} = Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3-8)$$

$$V_{Surto} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3-9)$$

$$T_D = \frac{l}{v} \quad (3-10)$$

Onde:

Z_{SURTO} = Impedância de surto (Ω);

L = Indutância do meio condutor por unidade de comprimento (H/m);

C = Capacitância do meio condutor por unidade de comprimento (F/m);

V_{SURTO} = Velocidade de propagação do surto no meio (m/s);

l = Comprimento da LT (m); e

v = velocidade de propagação do surto na LT (m/s).

Portanto, a relação entre a corrente, tensão e impedância do surto é definida pela expressão (3-11):

$$V = Z_{\text{surto}} \times I \quad (3-11)$$

A energia armazenada pelo surto que é absorvida pelo SPD pode ser estimada pela expressão (3-12):

$$W = \int_{t_1}^{t_2} V(t)I(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dV}{dt} \frac{dI}{dt} t^2 dt \quad (3-12)$$

Onde:

W = energia absorvida (J);

$\frac{dV}{dt}$ = taxa de variação da tensão de surto (V/m);

$\frac{dI}{dt}$ = taxa de variação da corrente de surto (A/m);

t_1 = tempo inicial para estabelecimento da energia, SPD começa a conduzir (s);

t_2 = tempo final para estabelecimento da energia, SPD para de conduzir (s);

$V(t)$ = queda de tensão através do SPD quando a corrente está sendo drenada (V); e

$I(t)$ = corrente que percorre o SPD (A).

3.4 Método Proposto

De uma forma simplificada, a coordenação entre dispositivos de proteção contra surtos em baixa tensão é alcançada quando o dispositivo localizado no painel de entrada da instalação consegue absorver a maior parte da energia do surto, enquanto que o dispositivo localizado próximo ao equipamento sensível absorve o restante da energia. Ressalta-se, que não existe a necessidade de que o SPD localizado próximo ao equipamento dissipe toda a energia do surto, mas sim que ele garanta que quaisquer níveis residuais estejam abaixo do nível de imunidade do equipamento a ser protegido. Desta forma, os SPD serão especificados de modo que a capacidade de absorção de energia deles não seja ultrapassada, e para que suas tensões de grampeamento sejam menores que os níveis de imunidade ou isolamento dos equipamentos e acessórios do sistema elétrico a ser protegido.

Torna-se necessário a utilização de softwares para as devidas análises de coordenação entre estes dispositivos, em face da grande quantidade de configurações existentes para os dispositivos e da diversidade de elementos que interferem na adequada coordenação entre eles. Desta maneira, o programa de transitórios eletromagnéticos ATP é considerado como uma ferramenta adequada para análises de desempenho dos sistemas de proteção contra surtos.

Entretanto, mesmo com a utilização de uma ferramenta como o ATP, as análises de coordenação das proteções podem se tornar numerosas e exaustivas. Diante disso, torna-se necessário a utilização de outra ferramenta para que se possa simular uma maior quantidade de casos possíveis e selecionar os dispositivos mais adequados de uma maneira menos onerosa. Portanto, para que as análises tornem-se mais dinâmicas, será utilizado o software MATLAB juntamente com o ATP.

A metodologia para avaliação do desempenho das configurações dos SPD tem como base avaliações analíticas preliminares e simulações computacionais utilizando o ATP e MATLAB. De uma maneira geral, as etapas representadas na Figura 18 devem ser consideradas na definição da proteção contra surtos de um sistema elétrico.

Figura 18 - Fluxograma funcional de critérios para seleção de um sistema coordenado de SPD

A. Definição do Sistema a ser Analisado.

B. Definição das Características do Sistema (conforme item 3.1.8):

- (1) Classificação das zonas de proteção, os possíveis tipos e níveis de surtos esperados para aquela instalação, conforme NBR 5419-1 [39] e IEC 62305-1 [30];
- (2) Definição do nível de imunidade ou suportabilidade de isolamento dos equipamentos, conforme IEC 61000-4-5 [27] e IEC 60664-1 [48], respectivamente; e
- (3) Definição dos parâmetros dos SPD e dos possíveis locais de instalação, seguindo as diretrizes da IEC 61643-11 [46] e IEC 61643-12 [28], respectivamente.

C. Implementação Computacional:

- (4) Modelagem dos componentes elétricos no ATP (surtos, circuitos, proteções e cargas elétricas);

- (5) Implementação no ATP da arquitetura do sistema, gerando 12 arranjos com diferentes conjuntos de proteções que servirão como base para geração de novas configurações. Os arranjos base possuem diversas chaves, desta forma é possível criar novas configurações através da mudança de estado destas;
- (6) Criação de novas configurações de arranjos através da mudança de estado das chaves pelo MATLAB, a partir dos arranjos implementados e simulados no ATP. Portanto, são 12 arranjos base com proteções instaladas, cada arranjo dará origem a 102 configurações distintas, totalizado 1224 configurações de arranjos do sistema. Em suma, a alteração do estado das chaves cria novas configurações de circuitos, assim como diferentes locais de aplicação das proteções e dos surtos; e
- (7) Simulação de todos os arranjos no ATP.

D. Análise Computacional:

- (8) Análise do comportamento do sistema, ou seja, se as variáveis a serem monitoradas estão dentro dos limites admissíveis: (i) tensão sobre os terminais dos equipamentos; e (ii) corrente drenada e energia absorvida pelos SPD;
- (9) Registro do comportamento de todos os arranjos, se estes estão protegidos e coordenados. O arranjo do sistema é considerado protegido e coordenado quando todas as variáveis monitoradas estão dentro dos limites para aquela configuração do sistema;
- (10) Avalia se as configurações de arranjo que possuem todos os dispositivos presentes estão protegidas e coordenadas para pelo menos um conjunto de proteções, caso sim, avança para o passo 11, caso não, retorna para o passo 3 e realiza a definição de novos parâmetros dos SPD para o sistema;
- (11) Classificação dos SPD para as configurações que possuem todos dispositivos presentes:
 - Compara as mesmas configurações de arranjos com diferentes conjuntos (padrões) de SPD especificados e classifica qual grupo de SPD apresentou o melhor desempenho para aquela configuração. A classificação de desempenho leva em consideração que o padrão de proteção aplicado deve não apenas manter o valor de todas as variáveis monitoradas abaixo dos

limites admissíveis, mas sim, o mais baixo possível em relação ao valor limite para cada variável, ou seja, os padrões que possuem a maior quantidade de variáveis controladas com valores mais distantes dos valores limítrofes são considerados os mais relevantes ou de melhor desempenho para aquela configuração de arranjo;

- Em seguida, são verificados entre os arranjos protegidos os padrões de proteção que obtiveram melhor desempenho (relevância). O conjunto das proteções que apresentar o melhor desempenho, no maior número de arranjos protegidos, será considerado o mais relevante globalmente para o sistema; e

- (12) Finalmente é efetuado o registro, mostrando os conjuntos de proteções que obtiveram o melhor desempenho individualmente para cada arranjo protegido e globalmente para o sistema como um todo.

Em (11) apenas as configurações que possuem todos os dispositivos de proteção presentes serão contabilizadas na tentativa de obtenção do melhor conjunto de SPD para a instalação. Esta premissa deve ser adotada, pois o surto pode incidir em diferentes sistemas de baixa tensão (Ex.: 480 V ou 220 V), sendo assim, proteções instaladas em um determinado sistema não conseguem proteger o outro sistema ao qual o surto incide.

Sintetizando, o cálculo de relevância de cada grupo de SPD para o sistema é calculado através da expressão (3-13):

$$Relevância (\%) = \frac{A}{B} \times 100 \quad (3-13)$$

Onde:

A = Soma do nº de configurações que o grupo de SPD obteve melhor desempenho; e

B = Número total de configurações protegidas.

Lembrado que, para uma determinada configuração de arranjo, o conjunto de proteção que possuir a maior quantidade de variáveis controladas com valores mais distantes dos valores limítrofes obtém o melhor desempenho para aquela configuração.

O fluxograma de processo computacional, mostrado na Figura 19, complementa a abordagem funcional trazida pela Figura 18 e ilustra os processos computacionais que devem ser seguidos para a implementação e análise do método.

Figura 19 - Fluxograma de processo computacional para implementação e análise do método

A numeração referente aos passos, mostrados na Figura 19 do fluxograma de processo computacional, é correspondente a numeração dos passos indicados na Figura 18 do fluxograma funcional.

Primeiramente, em (4) e (5) são modelados os componentes que serão utilizados nas simulações e os 12 arranjos base com diferentes grupos de proteções, esses arquivos possuem a extensão *.acp contendo todos os dados e representações gráficas dos circuitos. Rodando esses arquivos são gerados e armazenados os arquivos *.atp, onde estão contidos os dados de entrada da simulação, podendo estes serem editados.

Em seguida, em (6), o algoritmo implementado no MATLAB, responsável por gerar novas configurações, lê os 12 arquivos *.atp e manda reescrever para cada um deles as 102 sequências de chaves descritas em uma planilha (*.xls), que encontra-se no arquivo parâmetros de entrada. Portanto, são geradas 1224 simulações nesta etapa.

Os novos arquivos gerados são novamente armazenados e através de um diretório de comando (*.bat) são rodados no ATP em (7). A partir da simulação das 1224 configurações no ATP, são gerados os arquivos gráficos de resposta do sistema (*.pl4), estes são convertidos no PL42mat através de outro diretório de comando (*.bat), gerando desta forma 1224 arquivos *.mat que podem ser lidos e processados pelo MATLAB.

Em (8), o algoritmo de análise de arranjos do sistema compara os valores das variáveis monitoradas com uma planilha (*.xls) que contém os limites admissíveis para cada variável. Gerando outra planilha (*.xls) com o registro individual das variáveis monitoradas de cada uma das 1224 configurações, proporcionando as análises (9) e (10) a partir desta.

Em (11), o algoritmo de comparação e classificação de SPD além de confrontar os valores das variáveis monitoradas com a planilha dos limites admissíveis (*.xls), do arquivo de parâmetros de entrada, compara o desempenho individual de cada conjunto de proteção para uma determinada configuração de arranjo e o melhor desempenho entre todas configurações, efetuado finalmente em (12), o registro em uma planilha (*.xls) com a resposta do padrão de proteção mais relevante para o sistema.

Capítulo 4

Aplicações

Neste capítulo será aplicado o modelo proposto no capítulo 3 para proteção de um circuito típico de uma instalação nuclear, mas antes, será realizada a aplicação do modelo considerando uma configuração típica de rede desenvolvida e analisada em [18], para efeito de validação do modelo, assim como a verificação e análise da influência de alguns parâmetros inerentes ao sistema elétrico sobre a coordenação dos dispositivos de proteção.

4.1 Configuração Típica de Rede em Instalações

4.1.1 Descritivo

Em [18], o autor modelou uma instalação residencial submetida a um surto de corrente de 20 kA (10/350 μ s), com oito circuitos, estes foram representados por LT com perdas, como mostrado na Figura 20, adotando-se indutância, capacitância e resistência de 0,5 μ H/m, 50 pF/m e 0,01 Ω /m, respectivamente. Estes parâmetros dão origem a impedância característica, Z_0 , de 100 Ω e velocidade de propagação, v , de 200 m/ μ s, quando a resistência é negligenciada.

A expressão (4-1) representa a curva característica do modelo do MOV utilizada pelo autor em [18]:

$$I = k \times V^{30} \quad (4-1)$$

Foi utilizado um modelo de MOV com representação da capacitância parasita (C) e resistência elétrica do material (R), na tentativa de tornar as respostas do dispositivo ao surto mais realistas. As proteções foram especificadas pela tensão nominal de referência do varistor (V_N), ou seja, a tensão a partir da qual os dispositivos passam a conduzir uma corrente maior que 1 mA. Os parâmetros dos varistores utilizados no trabalho são apresentados na Tabela 5.

Figura 20 - Modelo empregado para uma instalação residencial

Fonte: Standler [18].

Tabela 5 - Parâmetros dos varistores

Varistor	Diâmetro	R	C
Para raios			
$V_N = 1000 \text{ V}$	80 mm	5 mΩ	7 nF
$V_N = 240 \text{ V}$	80 mm	1 mΩ	28 nF
Supressor			
$V_N = 390 \text{ V}$	10 mm	120 mΩ	0,2 nF
$V_N = 200 \text{ V}$	20 mm	16 mΩ	1,9 nF

Fonte: Standler [18].

4.1.2 Implementação e Análises

Para aplicação do modelo na instalação proposta por [18], foram simulados os casos com as configurações apresentadas na Tabela 6, utilizando os dispositivos B80K680, B80K150, S10K250 e S20K130, que possuem tensões de referência 1100 V, 240 V, 390 V e 205 V, respectivamente. Procurou-se adotar modelos de SPD com os mesmos diâmetros dos dispositivos adotados pelo artigo, entretanto existe uma pequena diferença quanto a tensão nominal dos varistores B80K680 e S20K130, em relação aos adotados pelo autor. Esta divergência não compromete as análises, já que a diferença entre a tensão nominal do modelo proposto e do modelo utilizado pelo autor é relativamente pequena.

Tabela 6 - Configuração dos SPD

Caso	SPD1	SPD2
0	-	-
1	B80K680	-
2	B80K680	S20K130
3	B80K150	-
4	B80K150	S10K250
5	B80K150	S20K130
Elemento desacoplador diminui de 30 m (0,15 μ s) para 2 m (0,01 μ s)		
6	B80K680	S20K130
7	B80K150	S10K250
8	B80K150	S20K130

Na Tabela 7 é apresentado a comparação entre os resultados das energias absorvidas pelos dispositivos de proteção, que foram encontrados pelo autor em [18] e que foram obtidos nas simulações utilizando-se o modelo implementado no ATP.

Tabela 7 - Comparação entre os resultados do autor e do modelo proposto

Caso	Standler [18]		Modelo do ATP		Taxa de erro	
	SPD1	SPD2	SPD1	SPD2	SPD1	SPD2
1	16,5 kJ	-	19,56 kJ	-	18,5 %	-
2	7,8 kJ	2,0 kJ	8,79 kJ	2,39 kJ	12,7 %	19,5 %
3	4,1 kJ	-	4,45 kJ	-	8,5 %	-
4	4,1 kJ	5,0 mJ	4,45 kJ	4,5 mJ	8,5 %	10,0%
5	3,8 kJ	0,2 kJ	4,19 kJ	0,17 kJ	10,3%	15,0 %
6	0,2 mJ	5,0 kJ	0,24 mJ	5,58 kJ	20,0 %	11,6%
7	4,1 kJ	5,0 mJ	4,45 kJ	4,5 mJ	8,5 %	10,0%
8	2,7 kJ	1,2 J	3,4 kJ	0,82 J	25,9 %	31,7%

Comparando os resultados encontrados nas simulações com os resultados apresentados em [18], pode-se verificar que o modelo implementado no ATP obteve respostas bem próximas ao trabalho realizado por Standler. Por inspeção, podemos verificar que os valores obtidos nas simulações diferenciaram, em média, entre 8,5% e 20% dos valores encontrados pelo autor. Ressalta-se que as discrepâncias encontradas são admissíveis, devido ao fato do autor usar uma equação de curva característica do varistor mais simplificada do que a utilizada nos varistores modelados no ATP, além disso, o autor não utiliza indutância

parasita no modelo de seus varistores e a capacitância parasita juntamente com a resistência elétrica, utilizadas por ele, diferenciam dos valores indicados pelo fabricante em [52].

Existem também, considerações do ponto de vista entre o cálculo numérico utilizado pelo PSPICE, à época em que o trabalho foi realizado, e o utilizado pelo ATP nas versões mais recentes.

Sem analisar a máxima energia que os dispositivos de proteção podem absorver, é possível verificar que a configuração do caso 6 é a mais crítica, no qual, a maior parte da energia do surto é depositada no supressor (SPD2), ao invés de ser absorvida pelo para raio (SPD1)

De maneira a ilustrar as simulações realizadas, são apresentadas para o caso 2, na Figura 21, Figura 22 e Figura 23, respectivamente, as correntes drenadas pelas proteções e a corrente de surto que atinge a instalação, a tensão sobre os terminais das proteções e a energia absorvida por eles.

Figura 21 - Corrente de surto e corrente drenada pelas proteções para o caso 2

Figura 22 - Tensão sobre os terminais das proteções para o caso 2

Figura 23 - Energia absorvida pelas proteções para o caso 2

Destaca-se que em [17], Standler, apresenta diversos modelos de representação dos condutores em um estudo de coordenação de dispositivos de proteção dentro de uma instalação. O autor recomenda o modelo completo de LT, com perdas, incluindo efeito pelicular para cálculos mais precisos. Entretanto, aponta nos resultados obtidos que a diferença entre o modelo completo de LT e um modelo de LT apenas com perdas ôhmicas não é significativa no estudo em questão. Ressalta-se, também, que o autor utilizou um modelo de dispositivo de proteção com indutância parasita, o que já se assemelha ao modelo implementado neste trabalho.

4.2 Efeito do Elemento Desacoplador e da Tensão de Grampeamento entre SPD

4.2.1 Descritivo

No estudo da influência do elemento desacoplador e da relação da tensão de grampeamento entre os SPD é considerado um circuito suprido por um sistema com tensão nominal de 127 V, que utiliza cabos de #25 mm² percorrendo condutos fechados, com resistência e indutância de 0,87 mΩ/m e 0,32 μH/m, respectivamente [60]. O SPD1 representa o protetor localizado no painel alimentador, enquanto o SPD2 representa o protetor localizado próximo ao equipamento, conforme apresentado na Figura 24. Neste estudo, o circuito simulado alimenta uma carga específica, cujo circuito da impedância de entrada é mostrado na Figura 25.

Figura 24 - Circuito básico de coordenação de SPD em cascata

Figura 25 - Impedância de entrada de um monitor de vídeo

Fonte: Bassi [54].

Para este sistema é assumido um surto de corrente com amplitude de 5 kA do tipo 8/20 μs. As proteções são representadas pelos modelos S20K150 e S20K250, cujas curvas características ($V \times I$) e as principais características de operação são mostradas na Figura 26 e na Tabela 8, respectivamente.

Figura 26 - Curva Característica (V x I) dos SPD S20K150 e S20K250

Tabela 8 - Principais características de operação das proteções

SPD	V_{RMS} (V)	V_{RMS_VAR} (V) (1 mA)	I_{MAX} (A)	E_{MAX} (J)
S20K150	150	$240 \pm 10\%$	8000	85
S20K250	250	$390 \pm 10\%$	8000	140

Para analisar a influência do elemento desacoplador e da relação da tensão de grampeamento entre os dispositivos, foram realizadas simulações considerando a distância entre os dispositivos variando de 1-120 m, utilizando passos de 1 m. São consideradas 4 configurações de dispositivos para realização das análises, conforme mostrado na Tabela 9. Desta forma, foram executadas 120 simulações por configuração (totalizando 480), sendo extraído das simulações os valores de energia absorvida, máxima corrente drenada e máxima tensão de grampeamento nos terminais dos dispositivos de proteção.

Tabela 9 - Configurações adotadas para as análises

Configuração	SPD1	SPD2	Relação Tensão de Grampeamento
1	S20K250	S20K250	Alto-Alto
2	S20K250	S20K150	Alto-Baixo
3	S20K150	S20K250	Baixo-Alto
4	S20K150	S20K150	Baixo-Baixo

4.2.2 Análises

De maneira simplificada, uma coordenação otimizada dos dispositivos de proteção é alcançada quando os valores de energia absorvida, corrente drenada e tensão grampeada nos terminais dos dispositivos a montante e a jusante asseguram uma margem de segurança entre eles, ou seja, a proteção instalada no painel alimentador deve absorver e drenar a maior parte da energia e da corrente de surto, enquanto que, a tensão nos terminais da proteção que atua como supressor de surto deve se manter baixa o suficiente para que não ponha em risco o funcionamento do equipamento a ser protegido.

Visto isso, a plotagem da energia, máxima corrente e máxima tensão entre os terminais das proteções, em função da distância, assume um importante papel, pois, desta forma, podemos verificar quando os valores a serem analisados dos respectivos dispositivos se aproximam.

A energia absorvida, máxima corrente drenada e máxima tensão de grampeamento das proteções, para a configuração 1, são apresentadas na Figura 27, Figura 28 e Figura 29, respectivamente.

Figura 27 - Energia absorvida pelas proteções – relação Alto-Alto

Figura 28 - Máxima corrente drenada pelas proteções - relação Alto-Alto

Figura 29 - Máxima tensão de grampeamento das proteções - relação Alto-Alto

A configuração 1 (relação tensão de grampeamento “Alto-Alto”) apresentou o seguinte desempenho:

- Os valores da energia absorvida e corrente drenada pelos dispositivos apresentam bom desempenho para distâncias mais longas, entretanto, para distâncias curtas, o SPD2 passa a ser responsável por drenar e dissipar boa parte do surto; e
- A tensão que aparece nos terminais do SPD2 é considerada alta para todas as distâncias simuladas (> 600 V), colocando em risco a proteção do equipamento.

A energia absorvida, máxima corrente drenada e máxima tensão de grampeamento das proteções, para a configuração 2, são apresentadas na Figura 30, Figura 31 e Figura 32, respectivamente.

Figura 30 - Energia absorvida pelas proteções – relação Alto-Baixo

Figura 31 - Máxima corrente drenada pelas proteções – relação Alto-Baixo

Figura 32 - Máxima tensão de grampeamento das proteções – relação Alto-Baixo

A configuração 2 (relação tensão de grampeamento “Alto-Baixo”) apresentou o seguinte desempenho:

- Os valores da energia absorvida e corrente drenada pelos dispositivos apresentam bom desempenho para distâncias mais longas (similar a configuração 1), porém para distâncias curtas, o SPD2 passa a drenar e dissipar a maior parte do surto, havendo desta maneira, uma inversão de valores, colocando em risco inclusive a integridade estrutural do dispositivo; e
- A tensão que aparece nos terminais do SPD2 é considerada boa, com valores abaixo de 600 V, e para distâncias maiores alcançaram amplitudes máximas inferiores a 400 V.

Para a configuração 2, quando a distância entre os dispositivos decresce, a energia absorvida pelo SPD2 tende a aumentar e a pelo SPD1 tende a diminuir de forma mais acentuada que nas outras configurações. Esta diminuição brusca da energia absorvida pelo SPD1 ocorre devido ao fato da indutância do cabo não prover suficiente queda de tensão ($L di/dt$), adicionalmente a baixa tensão de grampeamento do SPD2 reduz a tensão através dos terminais do SPD1, e consequentemente o nível de energia absorvida.

A energia absorvida, máxima corrente drenada e máxima tensão de grampeamento das proteções, para a configuração 3, são apresentadas na Figura 33, Figura 34 e Figura 35, respectivamente.

Figura 33 - Energia absorvida pelas proteções – relação Baixo-Alto

Figura 34 - Máxima corrente drenada pelas proteções – relação Baixo-Alto

Figura 35 - Máxima tensão de grampeamento das proteções – relação Baixo-Alto

A configuração 3 (relação tensão de grampeamento “Baixo-Alto”) apresentou o seguinte desempenho:

- a) Os valores da energia absorvida e corrente drenada pelos dispositivos apresentam bom desempenho para todas as distâncias (desempenho superior a configuração 1 e 2), entretanto, deve-se ressaltar que um dispositivo que apresenta baixo valor de tensão de grampeamento instalado no painel alimentador pode por em risco a sua própria funcionalidade, haja vista que, sua capacidade de absorção de energia é inferior aos dispositivos que possuem tensão de grampeamento mais elevadas; e
- b) A tensão que aparece nos terminais do SPD2 é considerada boa, com valores abaixo de 600 V, entretanto, para distâncias maiores apresenta desempenho inferior à configuração 2, pois em seus terminais aparecem valores de tensão próximos de 540 V.

A energia absorvida, máxima corrente drenada e máxima tensão de grampeamento das proteções, para a configuração 4, são apresentadas na Figura 36, Figura 37 e Figura 38, respectivamente.

Figura 36 - Energia absorvida pelas proteções – relação Baixo-Baixo

Figura 37 - Máxima corrente drenada pelas proteções – relação Baixo-Baixo

Figura 38 - Máxima tensão de grampeamento das proteções – relação Baixo-Baixo

A configuração 4 (relação tensão de grampeamento “Baixo-Baixo”) apresentou o seguinte desempenho:

- Os valores da energia absorvida e corrente drenada pelos dispositivos apresentam bom desempenho para distâncias mais longas, entretanto, para distâncias curtas, o SPD2 passa a ser responsável por drenar e dissipar boa parte do surto, assim como na configuração 1. A observação relativa à capacidade de dissipação de energia para o SPD1, abordado na configuração 3, também é válida para esta configuração; e
- A tensão que aparece nos terminais do SPD2 apresentou o melhor resultado de todas as configurações, do ponto de vista de proteção do equipamento, pois em

todas as simulações os valores de tensão se mantiveram abaixo de 500 V, e para distâncias maiores alcançaram amplitudes máximas inferiores a 360 V.

Sintetizando as análises dos resultados, na Tabela 10 é apresentado de forma qualitativa o desempenho dos dispositivos de proteção para distâncias mais curtas e mais longas, considerando como parâmetro, a energia absorvida e a corrente drenada pelas proteções, além da tensão nos terminais da proteção que atua como supressor de surto.

Tabela 10 - Análise qualitativa do desempenho das proteções

Configuração	Energia e Corrente		Tensão sobre o Supressor	
	Distâncias curtas	Distâncias longas	Distâncias curtas	Distâncias longas
1	Razoável	Bom	Ruim	Ruim
2	Ruim	Bom	Razoável	Bom
3	Bom	Bom	Bom	Razoável
4	Razoável	Bom	Bom	Bom

Foram consideradas apenas três categorias qualitativas para a análise do desempenho das proteções (Bom, Razoável e Ruim). Salienta-se que esta classificação foi realizada levando em consideração não apenas o desempenho individual de cada configuração, mas também, o desempenho comparativo entre os dispositivos, levando em conta os valores de energia, corrente e tensão apresentados acima nos gráficos e análises.

Lembra-se, que as análises de coordenação entre os SPD foram realizadas para um sistema submetido a um surto de corrente (8/20 μ s) com características impulsivas. Surtos com forma de onda longa impõem outros parâmetros para coordenação dos SPD. Em particular, O elemento desacoplador tem pouco efeito sobre surtos com formas de onda longas, em que o comprimento do circuito entre os protetores necessário para que ocorra a coordenação pode se tornar algumas vezes impraticável, conforme abordado em [20].

Para ilustrar as simulações realizadas, são apresentados os resultados ao longo do tempo para dois casos da configuração 2, o primeiro em que não houve bom desempenho do sistema de proteção (distância entre SPD 3 m) e o segundo em que houve bom desempenho do sistema (distância entre SPD 120 m).

A Figura 39, Figura 40 e Figura 41 mostram, respectivamente, a corrente de surto e as correntes drenadas pelas proteções, a tensão em seus terminais e a energia absorvida por eles para o caso em que o cabo alimentador possui 3 m de comprimento.

Figura 39 - Corrente de surto e corrente drenada pelas proteções – 3 m

Figura 40 - Tensão nos terminais das proteções – 3 m

Figura 41 - Energia absorvida pelas proteções – 3 m

Observa-se pela Figura 39 e Figura 41, como dito previamente, que houve uma inversão de papéis entre o SPD1 e o SPD2, este último foi responsável por drenar e absorver a maior parte da corrente e energia do surto, o que demonstra um desempenho não adequado para o sistema, apesar da Figura 40 mostrar que a tensão sobre os terminais do SPD2 não alcançaram valores muito elevados (< 600 V).

A Figura 42, Figura 43 e Figura 44 mostram, respectivamente, a corrente de surto e as correntes drenadas pelas proteções, a tensão em seus terminais e a energia absorvida por eles para o caso em que o cabo alimentador possui 120 m de comprimento.

Figura 42 - Corrente de surto e corrente drenada pelas proteções – 120 m

Figura 43 - Tensão nos terminais das proteções – 120 m

Figura 44 - Energia absorvida pelas proteções – 120 m

Inspecionando as figuras do caso que apresenta 120 m de cabo entre as proteções, verifica-se que houve um bom desempenho do sistema. O SPD1 drenou e absorveu a maior parte da corrente e energia do surto, deixando apenas valores residuais para o SPD2, além disso, a tensão sobre os terminais deste se mantiveram abaixo de 400 V.

4.3 Coordenação de SPD em Instalações Nucleares

4.3.1 Introdução

Destaca-se que as configurações de sistemas elétricos de instalações nucleares são bastante semelhantes quando se trata de usinas de geração de energia, mesmo para diferentes tecnologias de reatores. Adicionalmente, existe uma grande preocupação em relação a segurança de instalações nucleares frente aos efeitos de surtos eletromagnéticos induzidos no sistema elétrico. Como pode ser visto nos LER muitos eventos indesejáveis tem ocorrido devido a surtos no sistema elétrico das instalações, que apesar de não terem tido consequências severas como liberação de radiação para o meio ambiente, causaram desligamento das plantas, acionamento indevido dos sistemas de segurança e até mesmo danos físicos aos equipamentos. Frente a isso, será apresentado um estudo de coordenação de proteção contra surtos em um trecho do sistema elétrico típico de uma usina nuclear.

4.3.2 Localidade de Instalações Nucleares no Brasil

O Brasil conta hoje com seis reatores em operação e dois em construção, com aplicação na área de pesquisa, produção de radioisótopos e de produção de energia, conforme listado na Tabela 11.

Tabela 11 - Reatores em operação e em construção no Brasil

Instalação	Aplicação	Potência	Localização	Situação
ANGRA I	Produção de Energia	657 MW	Angra dos Reis/RJ	Operando
ANGRA II	Produção de Energia	1350 MW	Angra dos Reis/RJ	Operando
IEA-R1	Prod. Radioisótopos	5 MW	São Paulo/SP	Operando
IPEN-MB/01	Pesquisa	100W	São Paulo/SP	Operando
TRIGA-IPRI	Pesquisa	100 kW	Belo Horizonte/MG	Operando
ARGONAUTA	Pesquisa	500W	Rio de Janeiro/RJ	Operando
ANGRA III	Produção de Energia	1350 MW	Angra dos Reis/RJ	Construindo
LABGENE	Pesquisa	12 MW	Iperó/SP	Construindo

Fonte: Perrota [61].

Ressalta-se que a Tabela 11 aborda apenas instalações nucleares no Brasil que possuem reatores nucleares. Contudo, existem outras plantas no Brasil que fazem parte das outras etapas do ciclo do combustível nuclear, tendo o projeto de proteção contra surtos o mesmo nível de importância em relação a segurança da instalação.

As cidades onde existem instalações nucleares com reatores possuem as seguintes densidades de descargas atmosféricas por km² ao ano [62]:

- Angra dos Reis/RJ – 7,4 descargas/km²ano;
- Belo Horizonte/MG - 6,9 descargas/km²ano;
- Iperó/SP - 7,7 descargas/km²ano; e
- São Paulo/SP - 10,3 descargas/km²ano.

O valor da densidade de descargas atmosféricas é usado para o cálculo de análise do risco ao qual aquela instalação está submetida. A cidade de Angra dos Reis, apesar de não estar entre as cidades com maiores densidades, está localizada em uma região com índices moderados e fica apenas a 65 km de distância da cidade de Porto Real, que possui o maior índice de densidade de descargas atmosféricas por km²ano do Brasil, aproximadamente 20

descargas/km²ano [62]. A cidade de São Paulo também se destaca possuindo o maior número de descargas atmosféricas por ano entre as cidades do sudeste, quase 20 mil/ano.

4.3.3 Sistema Elétrico Típico de uma Usina Nuclear

A Figura 45 mostra o diagrama unifilar típico de uma usina nuclear de geração de energia.

Figura 45 - Diagrama unifilar típico de uma usina nuclear de geração de energia

Fonte: IEEE 308 [63].

O sistema elétrico de instalações nucleares deve possuir dois ou mais circuitos redundantes com a função de garantir a segurança da instalação contra algum evento base de projeto. A Figura 45 mostra um diagrama típico, desde a alimentação pelo sistema de

transmissão externo à instalação até seus sistemas internos, necessários para operação segura. Estão listados abaixo alguns exemplos de cargas elétricas que são importantes para a segurança de instalações nucleares, conforme abordado por Petreangeli [7]:

- Sistema de Resfriamento da Piscina de Combustível Irradiado;
- Sistema de Remoção de Calor Residual;
- Sistema de Ventilação de Emergência;
- Sistema de Suprimento de Água de Emergência;
- Sistema de Pressão do Vaso do Reator; e
- Sistema de Suprimento de Água Borada.

As cargas elétricas envolvidas nestes sistemas de segurança são de forma simplificada:

- Atuadores em geral, alimentados pelo sistema CC;
- Bombas para circulação de água;
- Compressores de ar;
- Chillers;
- Instrumentação;
- Retificadores;
- Inversores; e
- Ventiladores exaustores.

Equipamentos de I&C merecem destaque pela importância que apresentam quanto a segurança nuclear, larga aplicação nos sistemas modernos e sensibilidade que possuem aos surtos.

4.3.4 Aplicação do Método Proposto

Nesta seção será aplicado o método que foi proposto em 3.4, para obtenção e análise otimizada das possíveis configurações de proteções contra surtos a serem implementadas em uma instalação nuclear.

4.3.4.1 Definição do sistema

Foi selecionado o trecho típico da instalação que está em destaque na Figura 45, para realização das simulações e respectivas análises, sendo mostrado com mais detalhes na Figura 46. Adotou-se inicialmente um sistema elétrico solidamente aterrado sem resistência de aterramento. Desta forma, para trabalhos posteriores deve-se levar em consideração a impedância e o tipo de aterramento da instalação.

Figura 46 - Sistema elétrico simulado a ser protegido

Onde:

CBT = Cubículo de baixa tensão;

CCM = Centro de controle de motores;

GDG = Grupo diesel gerador;

LT = Modelo de linhas de transmissão que representam os cabos alimentadores (LT1 a LT12);

QD = Quadro de distribuição local;

M = Motores (M1, M2 e M3);

S = Chaves comutadoras utilizadas para mudar a configuração dos circuitos, assim como das proteções;

SPD = Dispositivo de proteção contra surtos instalados em painéis e junto aos equipamentos (SPD_CBT, SPD_CCM, SPD_QD, SPD_X1 a SPD_X5);

SURTO 1 = Surto incidente no sistema 480 V;

SURTO 2 = Surto incidente no sistema 220 V;

TRF = Transformador de força; e

X = Código dos equipamentos sensíveis (X1, X2, X3, X4 e X5).

Alterando-se o estado das chaves são geradas várias configurações de circuitos, assim como os locais de aplicação das proteções e dos surtos. São adotados 12 conjuntos de proteções, sendo que cada um é aplicado em 102 arranjos diferentes, totalizando 1224 simulações. Caso nenhum dos 12 conjuntos de proteções atenda o método proposto em uma primeira etapa, deverão ser testados outros 12 conjuntos, e assim por diante até que se consiga alcançar o passo 12 do método, ou seja, o objetivo.

No sistema analisado, os cabos de alimentação elétrica dos painéis e equipamentos são representados por LT, cujas características estão indicadas na Tabela 12. Estas características foram obtidas com o auxílio do componente LCC (*Line/Cable Constant*) do ATP, que calcula os parâmetros do cabo a partir de dados de entrada como: dimensões, característica do material e meio de instalação. As dimensões e características do material que compõem os cabos foram extraídas do catálogo de um fabricante [64].

Tabela 12 - Característica dos cabos de alimentação

Cabo	Seção	D (m)	R (mΩ/m)	Z ₀ (Ω/m)	V _{surto} (m/s)
LT1	# 3x240mm ²	10	0,055	16,73	1.97677E+08
LT2	# 300mm ²	10	0,045	16,34	1.97677E+08
LT3	# 185mm ²	10	0,071	17,38	1.97677E+08
LT4	# 2x150mm ²	50	0,086	17,53	1.97677E+08
LT5	# 2,5mm ²	10	5,41	43,19	1.97677E+08
LT6	# 2,5mm ²	30	5,41	43,19	1.97677E+08
LT7	# 2,5mm ²	50	5,41	43,19	1.97677E+08
LT8	# 6mm ²	20	2,41	37,55	1.97677E+08
LT9	# 6mm ²	40	2,41	37,55	1.97677E+08
LT10	# 50mm ²	30	0,26	22,11	1.97677E+08
LT11	# 50mm ²	50	0,26	22,11	1.97677E+08
LT12	# 50mm ²	100	0,26	22,11	1.97677E+08

O cálculo da impedância característica (Z₀) mostrada na tabela é dada pela equação

(3-6), ou seja, apenas $\sqrt{L/C}$.

4.3.4.2 Definição Características do Sistema (conforme item 3.1.8)

4.3.4.2.1 Classificação das zonas de proteção e possíveis tipos e níveis de surtos esperados

São considerados dois surtos que incidem na instalação em diferentes pontos, o primeiro atinge o sistema de energia de nível de tensão 480 V e o segundo atinge o sistema de energia de nível de tensão 220 V, não está sendo considerado que os surtos incidem na instalação no mesmo instante.

Conforme previsto pela NBR 5419-1 [39] e IEC 62305-1 [30] deve ser considerado para instalações nucleares descargas atmosféricas (primeiro impulso positivo) com amplitudes de até 200 kA, diante disso, para o sistema de energia com nível de tensão 480 V, considera-se a pior situação, quando uma descarga atmosférica atinge a estrutura da instalação, onde 50% é conduzida para o subsistema de aterramento e 50% retornam pelos condutores (3F+N). Portanto, será considerada uma onda impulsiva que atinge o CBT com amplitude de 25 kA por fase (100kA/4) na forma de onda 8/20 μ s.

Para o segundo surto incidente, será levado em conta a mesma premissa que a anterior, ou seja, a descarga atmosférica atinge a estrutura da instalação (dano envolvido S1), entretanto, é considerado que o sistema a ser protegido esteja localizado na zona de proteção LPZ 2. Portanto, será previsto um surto de corrente que atinge o QD com amplitude de 10 kA na forma de onda 8/20 μ s.

A Tabela 13 sintetiza as considerações adotadas para classificação das zonas de proteção e os possíveis níveis de surtos envolvidos no sistema a ser protegido.

Tabela 13 - Zonas de proteção e níveis de surto

Sistema	Zona de Proteção	Surto
480 V	LPZ 1	25 kA – 8/20 μ s
220 V	LPZ 2	10 kA – 8/20 μ s

4.3.4.2.2 Nível de imunidade e isolamento dos equipamentos

O nível de imunidade dos equipamentos sensíveis (X1 a X5) e o nível básico de isolamento dos painéis elétricos, transformador, gerador e motores são adotados como parâmetros para proteção do sistema, conforme Tabela 14.

Tabela 14 - Nível básico de isolamento e imunidade dos equipamentos

Equipamento	NBI	Imunidade	Referência
CBT	12 kV	-	[65]
CCM	12 kV	-	[65]
GDG	4 kV	-	[48]
Transformador (primário/secundário)	12/10 kV	-	[66]
QD	8 kV	-	[65]
Motores (M1, M2 e M3)	4 kV	-	[48]
Equipamentos (X1, X2, X3, X4 e X5)	-	500 V	[27]

4.3.4.2.3 Parâmetros das proteções contra surtos e possíveis locais de instalação

Devem ser aplicados SPD que possuam especificações compatíveis com os níveis de corrente e energia dos surtos esperados para o sistema elétrico. Portanto, caso haja a necessidade, deverão ser selecionadas proteções, a serem instaladas nos painéis de alimentação, com capacidade de condução de corrente superior a 25 kA para o sistema 480 V e superior a 10 kA para o sistema 220 V. Os SPD que atuam como supressores junto aos equipamentos não precisam atender a este critério, haja vista que os mesmos deverão ser responsáveis por drenar apenas valores residuais da corrente de surto. Diante destes requisitos, a Tabela 15 apresenta os possíveis conjuntos de proteções a serem instalados no sistema e a Tabela 16 apresenta as principais características de operação dos modelos utilizados.

Tabela 15 - Conjuntos de proteções que serão aplicados no sistema

Conjunto Proteções	SPD_CBT	SPD_CCM	SPD_QD	SPD_X1	SPD_X2	SPD_X3	SPD_X4	SPD_X5
P01	B32K320	B32K320	B32K150	S05K130	S05K130	S05K130	S05K130	S05K130
P02	B32K320	B32K320	B32K150	S10K150	S10K150	S10K150	S10K150	S10K150
P03	B32K320	B32K320	B32K150	S10K250	S10K250	S10K250	S10K250	S10K250
P04	B32K320	B32K320	B32K250	S05K130	S05K130	S05K130	S05K130	S05K130
P05	B32K320	B32K320	B32K250	S10K150	S10K150	S10K150	S10K150	S10K150
P06	B32K320	B32K320	B32K250	S10K250	S10K250	S10K250	S10K250	S10K250
P07	B32K550	B32K550	B32K150	S05K130	S05K130	S05K130	S05K130	S05K130

Conjunto Proteções	SPD_CBT	SPD_CCM	SPD_QD	SPD_X1	SPD_X2	SPD_X3	SPD_X4	SPD_X5
P08	B32K550	B32K550	B32K150	S10K150	S10K150	S10K150	S10K150	S10K150
P09	B32K550	B32K550	B32K150	S10K250	S10K250	S10K250	S10K250	S10K250
P10	B32K550	B32K550	B32K250	S05K130	S05K130	S05K130	S05K130	S05K130
P11	B32K550	B32K550	B32K250	S10K150	S10K150	S10K150	S10K150	S10K150
P12	B32K550	B32K550	B32K250	S10K250	S10K250	S10K250	S10K250	S10K250

Tabela 16 - Principais características de operação das proteções

SPD	V_{RMS} (V)	V_{RMS_VAR} (V) (1 mA)	I_{MAX} (A)	E_{MAX} (J)
B32K150	150	$240 \pm 10\%$	25000	240
B32K250	250	$390 \pm 10\%$	25000	330
B32K320	320	$510 \pm 10\%$	25000	430
B32K550	550	$910 \pm 10\%$	25000	620
S05K130	130	$205 \pm 10\%$	400	4,2
S10K150	150	$240 \pm 10\%$	2500	24
S10K250	250	$390 \pm 10\%$	2500	38

As curvas características (V x I) dos modelos de dispositivos utilizados na proteção dos arranjos são mostradas na Figura 47 para as proteções que são instaladas nos painéis alimentadores e na Figura 48 para as proteções que atuam como supressores de surto junto aos equipamentos sensíveis.

Figura 47 - Curva Característica (V x I) dos dispositivos instalados nos painéis alimentadores

Figura 48 - Curva Característica (V x I) dos dispositivos instalados como supressores de surto

4.3.4.3 Implementação Computacional

4.3.4.3.1 Modelagem de componentes

Foi realizada a modelagem dos componentes elétricos no ambiente do ATPDraw utilizando-se os conceitos dos modelos dos componentes elétricos descritos na seção 3.2. As bibliotecas montadas no ATPDraw dos componentes para implementação computacional podem ser verificadas no Anexo A.

4.3.4.3.2 Implementação de um arranjo base e geração de novos arranjos

Após a modelagem dos componentes no ATP foram gerados 12 arranjos base com os conjuntos de proteção indicados na Tabela 15. Estes arranjos possuem diversas chaves que

seguirão uma sequência de comutação (apresentada no anexo B), gerando novas configurações do sistema com as seguintes características:

- Surto incidindo no sistema 480 V - alimentação pela rede – sem proteção - NPP001 a NPP012;
- Surto incidindo no sistema 480 V - alimentação pela rede – proteção no CBT - NPP013 a NPP024;
- Surto incidindo no sistema 480 V - alimentação pela rede – proteção no CBT e CCM – NPP025 a NPP030;
- Surto incidindo no sistema 480 V - alimentação pela rede – proteção no CBT, CCM e QD - NPP031 a NPP042;
- Surto incidindo no sistema 480 V - alimentação pela rede – proteção apenas nos equipamentos sensíveis - NPP043 a NPP052;
- Surto incidindo no sistema 480 V - alimentação pela rede – proteção no CBT, CCM, QD e equipamentos sensíveis (todas as proteções) – NPP053 a NPP062;
- Surto incidindo no sistema 480 V - alimentação pelo GDG – proteção no CBT, CCM, QD e equipamentos sensíveis (todas as proteções) - NPP063 a NPP072;
- Surto incidindo no sistema 220 V - alimentação pela rede – proteção apenas nos equipamentos sensíveis - NPP073 a NPP082;
- Surto incidindo no sistema 220 V - alimentação pela rede – proteção no CBT, CCM e QD e equipamentos sensíveis (todas as proteções) – NPP083 a NPP092; e
- Surto incidindo no sistema 220 V - alimentação pelo GDG – proteção no CBT, CCM, QD e equipamentos sensíveis (todas as proteções) - NPP093 a NPP102.

Apenas as configurações que possuem todos os dispositivos de proteção presentes, ou seja, configurações NPP053 a NPP072 e NPP083 a NPP102 serão contabilizadas na tentativa de se encontrar o melhor conjunto de proteções para o sistema. As outras configurações são analisadas apenas a título de verificação da influência das diferentes configurações sobre a proteção do sistema e a coordenação entre os dispositivos.

4.3.4.4 Análise Computacional

4.3.4.4.1 Análise dos arranjos gerados e registro dos resultados – etapa 1

1. Análise dos resultados para o sistema sem proteção

Os resultados das simulações do sistema sem proteção contra surtos (NPP001 a NPP012) alerta sobre os possíveis perigos e danos associados que um sistema elétrico de baixa tensão está sujeito. Em todas as configurações, sobretensões acima dos limites admissíveis apareceram nos terminais dos equipamentos do sistema 480 V. Tal fato ocorreu também na maioria das configurações para os equipamentos do sistema 220 V.

Na Figura 49, para a configuração NPP007, são apresentadas as tensões sobre os equipamentos sensíveis do sistema 220 V que tiveram seus limites de tensão admissíveis ultrapassados.

Figura 49 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis – NPP007

2. Análise dos resultados para o sistema com proteção (conforme Tabela 15)

A1. Surto de corrente 8/20 μ s incidindo no sistema 480 V - NPP013 a NPP072

(a) Proteção no CBT – alimentação pela rede – NPP013 a NPP024

Para todos os padrões de proteção (P01 a P12) verifica-se que apesar do sistema ter sido protegido houve dano ao dispositivo de proteção instalado no CBT, ou seja, o nível de tensão sobre os equipamentos se mantiveram abaixo dos limites de NBI e imunidade,

entretanto a energia e a corrente do surto drenada pelo SPD ultrapassaram seus limites admissíveis.

Para ilustrar, na Figura 50 são apresentadas a corrente drenada e a energia absorvida pela proteção do CBT para a configuração NPP019 com o padrão de proteção P02.

Figura 50 - Corrente e energia absorvida pela proteção do CBT – NPP019 – P02

(b) Proteção no CBT e CCM – alimentação pela rede – NPP025 a NPP030

Para todos os padrões de proteção verifica-se, também, que apesar do sistema ter sido protegido houve dano ao dispositivo de proteção instalado no CBT, entretanto, apenas o nível de energia absorvido pela proteção do CBT ultrapassou o limite aceitável.

Para ilustrar, na Figura 51 são apresentadas a corrente drenada e a energia absorvida pela proteção do CBT e CCM para a configuração NPP030 com padrão de proteção P02.

Figura 51 - Corrente e energia absorvida pelas proteções do CBT e CCM – NPP030 – P02

(c) Proteção no CBT, CCM e QD – alimentação pela rede – NPP031 a NPP042

Para todos os padrões de proteção, as configurações NPP031 e NPP038 a NPP042, em que a chave que a supre o CCM está aberta, o sistema tem a mesma resposta da análise realizada em (a). Para as configurações NPP032 a NPP037, em que a chave que supre o CCM está fechada, o sistema tem a mesma resposta da análise realizada em (b).

(d) Proteção apenas nos equipamentos sensíveis – alimentação pela rede – NPP043 a NPP052

Para todos os padrões de proteção, nas configurações com proteções instaladas apenas nos equipamentos sensíveis, diferentemente do que ocorreu nas configurações anteriores analisadas em (a), (b) e (c), não houve a proteção do sistema.

Para as configurações NPP043 a NPP047, em que a chave que supre o CCM está fechada, as tensões sobre o CBT, CCM, M1, M2, M3 e o primário do TRF ultrapassaram o NBI destes equipamentos, além disso, especificamente para os padrões de proteção P03, P06, P09 e P12, surgiram tensões acima do limite de imunidade dos equipamentos sensíveis, tal fato se deve a tensão de operação mais elevada que os dispositivos de proteção dos equipamentos sensíveis apresentam para estes padrões.

Nas configurações NPP048 a NPP052, em que a chave que supre o CCM está aberta, passaram a ocorrer para todos os padrões de proteção, tensões acima do nível de imunidade dos equipamentos sensíveis e, especificamente para a configuração NPP052, apareceram tensões que ultrapassaram o NBI do secundário do TRF e do QD. Destacam-se, as configurações NPP048 e NPP050, pois quando as chaves que suprem X1 e X2 em NPP048 estão fechadas, X5 está protegido, entretanto, quando estas chaves comutam de estado para aberto, representada na configuração NPP050, a tensão sobre X5 ultrapassa seu limite de imunidade. Verificam-se, de maneira geral, que os equipamentos cujos comprimentos dos circuitos alimentadores são menores, são os mais susceptíveis aos efeitos do surto.

A análise das configurações NPP043 a NPP052 mostra claramente que um equipamento pode estar protegido para uma determinada configuração do sistema e para outra configuração sua proteção pode ficar comprometida.

Para ilustrar, na Figura 52 e na Figura 53 são apresentadas para o padrão de proteção P02, as tensões sobre os equipamentos sensíveis do sistema 220 V que tiveram seus limites de tensão admissíveis ultrapassados para as configurações NPP048 e NPP050, respectivamente.

Figura 52 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis – NPP048 – P02

Figura 53 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis – NPP050 – P02

- (e) Proteção no CBT, CCM, QD e equipamentos sensíveis (todas as proteções) – alimentação pela rede – NPP053 a NPP062

Para todos os padrões de proteção, as configurações NPP053 a NPP057, em que a chave que a supre o CCM está fechada, o sistema tem a mesma resposta da análise realizada em (b). Para as configurações NPP058 a NPP062, em que a chave que supre o CCM está aberta, o sistema tem a mesma resposta da análise realizada em (a). Desta forma, o sistema está protegido, entretanto houve dano ao dispositivo de proteção do CBT.

- (f) Proteção no CBT, CCM, QD e equipamentos sensíveis (todas as proteções) – alimentação pelo GDG - NPP063 a NPP072

Assim como em (e), para todos os padrões de proteção, as configurações NPP063 a NPP067, em que a chave que a supre o CCM está fechada, o sistema tem a mesma resposta da análise realizada em (b). Para as configurações NPP068 a NPP072, em que a chave que supre o CCM está aberta, o sistema tem a mesma resposta da análise realizada em (a).

A2.Surto de corrente 8/20 μ s incidindo no sistema 220 V - NPP073 a NPP102

- (g) Proteção apenas nos equipamentos sensíveis – alimentação pela rede – NPP073 a NPP082

Para todos os padrões de proteção, não houve a proteção do sistema para as configurações com proteções instaladas apenas nos equipamentos sensíveis. O nível de tensão sobre todos os 5 equipamentos sensíveis (X1, X2, X3, X4 e X5) ultrapassou os limites de imunidade destes, assim como ultrapassou o NBI do QD e do secundário do TRF. Verifica-se que a tensão não ultrapassa o NBI do TRF para as configurações NPP077 e NPP078, no qual todos os circuitos dos equipamentos sensíveis estão presentes.

Adicionalmente, menciona-se que, para a maioria dos padrões de proteção aplicados houve dano à estrutura dos dispositivos que atuam como supressores.

Para ilustrar, na Figura 54 são apresentadas as tensões sobre os equipamentos sensíveis e do respectivo painel alimentador, aos quais tiveram seus limites de tensão admissíveis ultrapassados para a configuração NPP077 com padrão de proteção P03.

Figura 54 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis e o painel alimentador – NPP077 – P03

- (h) Proteção no CBT, CCM, QD e equipamentos sensíveis (todas as proteções) – alimentação pela rede - NPP083 a NPP092

Para estas configurações, houve tanto a proteção do sistema quanto a manutenção da integridade das proteções, entretanto, este fato ocorreu apenas para os padrões de proteção P01, P02, P05, P07, P08 e P11.

- (i) Proteção no CBT, CCM, QD e equipamentos sensíveis (todas as proteções) – alimentação pelo GDG - NPP093 a NPP102

Assim como em (h), para estas configurações, houve tanto a proteção do sistema quanto a manutenção da integridade das proteções para os padrões de proteção P01, P02, P05, P07, P08 e P11.

3. Síntese das análises

- NPP013 a NPP072

Uma análise resumida para as configurações NPP013 a NPP072, com surto incidente no sistema 480 V, é que apesar dos dispositivos instalados no CBT e no CCM protegerem o sistema, a integridade destes fica comprometida, devendo-se, desta forma, aumentar a capacidade de absorção de energia e condução de corrente destes dispositivos, sem necessariamente aumentar a tensão de grampeamento sobre seus terminais, pois esta poderia colocar em risco a proteção do sistema, aumentando a tensão sobre os equipamentos. Portanto, a melhor solução seria adotar dispositivos com maior diâmetro de disco. Sendo assim, os modelos B60K320 e B60K550 são possíveis soluções a serem testadas no lugar dos modelos B32K320 e B32K550, respectivamente.

Dispositivos de proteção aplicados apenas aos equipamentos sensíveis são inadequados mesmo para proteção deles mesmos, uma simples mudança de configuração do sistema pode pôr em risco a proteção de um equipamento antes protegido.

- NPP073 a NPP102

Considerando o surto incidindo no sistema 220 V, em relação às configurações que apresentam dispositivos de proteção apenas nos equipamentos sensíveis (NPP073 a NPP082), estas se mostram inadequadas, pois além de não protegerem os equipamentos, também não são capazes de manter a própria integridade dos dispositivos. Portanto, proteções a serem instaladas nos painéis alimentadores fazem-se necessárias.

Por outro lado, as configurações NPP083 a NPP102 foram as únicas em que se obteve 100% da proteção das variáveis monitoradas do sistema. Entretanto, este fato ocorreu apenas para os conjuntos de proteção P01, P02, P05, P07, P08 e P11.

4.3.4.4.2 Comparação e classificação dos padrões de proteção – etapa 1

Os padrões de proteção P03, P04, P06, P09, P10 e P12 não obtiveram em nenhuma das 90 configurações (NPP013 a NPP102) todas as variáveis dentro dos limites admissíveis para uma mesma configuração. Entretanto, os padrões de proteção P01, P02, P05, P07, P08 e P11 obtiveram todas as variáveis dentro dos limites admissíveis para as configurações NPP083 a NPP102, desta forma, é apresentado na Tabela 17 um resumo das simulações e resultados.

Tabela 17 - Resumo simulações e resultados – etapa 1

Simulações	1224 (A x C)
Simulações com proteções	1080 (B x C)
A. Configuração de arranjos	102 (NPP001-NPP102)
B. Configuração de arranjos com proteção	90 (NPP013-NPP102)
C. Proteções	12 padrões
Arranjos protegidos	120 (D x E)
D. Configuração de arranjos protegidos	20 (NPP083-NPP102)
E. Padrões de proteção efetivos	6 (P01, P02, P05, P07, P08 e P11)

Para esta etapa não houve um conjunto de proteções que foi relevante globalmente para o sistema, pois das configurações que possuem todos os dispositivos aplicados, apenas as configurações NPP083 a NPP102 obtiveram resultados satisfatórios. Desta forma, mostra-se na Figura 55 a relevância dos padrões de proteção para estas configurações.

Figura 55 - Relevância para as configurações NPP083-NPP102

Das 20 configurações de arranjos protegidos, o padrão de proteção P02 foi mais relevante em 19 configurações, enquanto que P01 foi mais relevante em apenas uma (NPP083).

4.3.4.4.3 Análise dos arranjos gerados e registro dos resultados – etapa 2

Como foi dito anteriormente nas análises das simulações da etapa 1, será necessário realizar a substituição das proteções aplicadas no sistema 480 V. Portanto, para esta nova etapa, os modelos B32K320 e B32K550 serão substituídos pelos modelos B60K320 e B60K550, respectivamente.

A curva ($V \times I$) e as características operacionais dos novos modelos de dispositivos são mostradas na Figura 56 e na Tabela 18, respectivamente.

Figura 56 - Curva Característica ($V \times I$) dos novos dispositivos instalados no CBT e CCM

Tabela 18 - Principais características de operação dos novos dispositivos

SPD	V_{RMS} (V)	V_{RMS_VAR} (V) (1 mA)	I_{MAX} (A)	E_{MAX} (J)
B60K320	320	$510 \pm 10\%$	70000	1000
B60K550	550	$910 \pm 10\%$	70000	1500

Os padrões de proteção P01, P02, P05, P07, P08 e P11 mantiveram os valores de todas as variáveis monitoradas, das possíveis configurações de circuitos, abaixo dos limites admissíveis, com exceção das configurações NPP043 a NPP052 e NPP073 a NPP082, pois estas, conforme abordado anteriormente, são configurações com proteções apenas nos equipamentos sensíveis e apresentam desempenho insatisfatório para a proteção do sistema.

As proteções P03, P04, P06, P09, P10 e P12 obtiveram desempenho satisfatório para as configurações: NPP013 a NPP042 e NPP053 a NPP072. Estes diferenciaram dos padrões de proteção supracitados nas configurações NPP83 a NPP102, ou seja, quando o surto incide diretamente no sistema 220 V, estes padrões de dispositivos não possuíram bom desempenho para estas configurações, apresentando desta forma, variáveis monitoradas acima dos limites aceitáveis.

4.3.4.4.4 Comparação e classificação dos padrões de proteção– etapa 2

Na Tabela 19 é mostrado um resumo das simulações e seus respectivos resultados. Já na Figura 57 é apresentada a relevância global das proteções para o sistema.

Tabela 19 - Resumo simulações e resultados – etapa 2

Simulações	1224 (A x C)
Simulações com proteções	1080 (B x C)
A. Configuração de arranjos	102 (NPP001-NPP102)
B. Configuração de arranjos com proteção	90 (NPP013-NPP102)
C. Proteções	12 padrões
Arranjos protegidos	720
D. Configuração de arranjos protegidos	70 (NPP013-NPP042, NPP053-NPP072 e NPP083-NPP102)
E. Padrões de proteção efetivos	12 (P01-P12)

Figura 57 - Relevância global dos padrões de proteção – etapa 2

Das 40 configurações consideradas para o cálculo de relevância global (NPP053 a NPP072 e NPP083 a NPP102), o padrão de proteção P02 obteve o melhor desempenho em vinte uma destas; em segundo lugar ficou o P03 em quinze; em terceiro P01 em oito; em quarto P04 em duas; e finalmente em quinto P08 em apenas uma configuração, os outros padrões de proteção não obtiveram melhor desempenho em nenhuma destas configurações.

Verifica-se que a soma das relevâncias de cada padrão de proteção não corresponde ao total de configurações de arranjos protegidos, isto porque, houve empate de relevância de alguns padrões de proteção para uma mesma configuração de arranjo.

Vale destacar que o conjunto P03 obteve a maior relevância para as configurações NPP053 a NPP072, surto incidindo no sistema de 480 V, sendo melhor em 15 das 20 configurações, enquanto que o conjunto P02 (maior relevância global) obteve melhor desempenho em apenas uma destas configurações. Entretanto, P02 obteve todos os 20 melhores resultados entre as configurações NPP083 a NPP102, surto incidindo no sistema de 220 V. Mostra-se na Figura 58 a relevância dos padrões de proteção separadamente para NPP053 a NPP072 e NPP083 a NPP102.

Figura 58 - Relevância dos padrões de proteção para NPP053-NPP072 e NPP083-NPP102

Analisando os dados, verifica-se para P03 que os dispositivos que atuam como supressores dos equipamentos sensíveis, por apresentarem tensões de operação mais elevadas, quando comparado aos outros padrões de proteção, foram responsáveis pelo mau desempenho do conjunto nas configurações NPP083 a NPP102. Tal fato ocorreu devido às sobretensões que apareceram sobre os terminais dos equipamentos sensíveis, não havendo desta forma, uma boa coordenação de energia entre estes dispositivos e os outros aplicados nos painéis.

É importante saber que não existe um único motivo que indique o porquê um conjunto de proteções se destacou em relação a outro, são muitas influências e diversas combinações de variáveis que atuam sobre estes resultados.

4.3.4.4.5 Ilustrações do padrão de proteção mais relevante – etapa 2

Após a verificação do conjunto de proteções que obtiveram o melhor desempenho, ou seja, foram mais relevantes para as diferentes configurações de arranjo do sistema analisado, serão ilustrados nesta seção as configurações de arranjo NPP057 e NPP087 para o conjunto de proteções P02. Sendo que, em NPP057 o surto incide no sistema de 480 V e em NPP087 o surto incide no sistema de 220 V.

Destacam-se nas ilustrações, tensões oscilatórias sobre os equipamentos que ocorrem devido a característica RLC do próprio sistema e aos fenômenos de reflexão de ondas das LT.

Para a configuração NPP057 são selecionadas as ilustrações do desempenho dos dispositivos de proteção instalados no sistema de 480 V e as ilustrações das tensões sobre todos os equipamentos do arranjo. A Figura 59 mostra a corrente e a energia absorvida pelos dispositivos de proteção do CBT e CCM; a Figura 60 mostra a tensão sobre o CBT, CCM e os motores; a Figura 61 mostra a tensão sobre o primário e o secundário do TRF; e a Figura 62 mostra a tensão sobre os equipamentos sensíveis e o painel de alimentação destes.

Figura 59 - Corrente e energia absorvida pelas proteções do CBT e CCM – NPP057 – P02

Figura 60 - Tensão sobre o CBT, CCM e motores – NPP057 – P02

Figura 61 - Tensão sobre o primário e secundário do TRF – NPP057 – P02

Figura 62 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis e o painel alimentador – NPP057 – P02

Para a configuração NPP087 são seleccionadas as ilustrações do desempenho dos dispositivos de proteção instalados no sistema de 220 V e as ilustrações das tensões sobre todos os equipamentos do arranjo. A Figura 63 mostra a corrente e a energia absorvida pelos dispositivos de proteção do QD; a Figura 64 mostra a corrente e a energia absorvida pelos dispositivos de proteção dos equipamentos sensíveis; a Figura 65 mostra a tensão sobre os equipamentos sensíveis e o painel de alimentação destes; a Figura 66 mostra a tensão sobre o primário e o secundário do TRF; e a Figura 67 mostra a tensão sobre o CBT, CCM e os motores.

Figura 63 - Corrente e energia absorvida pela proteção do QD – NPP087 – P02

Figura 64 - Corrente e energia absorvida pelas proteções dos equipamentos sensíveis – NPP087 – P02

Figura 65 - Tensão sobre os equipamentos sensíveis e o painel alimentador – NPP087 – P02

Figura 66 - Tensão sobre o primário e secundário do TRF – NPP087 – P02

Figura 67 - Tensão sobre o CBT, CCM e motores – NPP087 – P02

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusão

Este trabalho apresentou uma metodologia para seleção de dispositivos de proteção contra surtos, sendo destacada a aplicação desta à sistemas em baixa tensão de instalações nucleares. Apresenta-se a análise de desempenho para diferentes conjuntos de proteção aplicados a diversas configurações possíveis. A metodologia proposta apresentou resultados encorajadores, possibilitando a avaliação da influência de diversas variáveis.

Menciona-se que o método utilizado para alcançar a coordenação entre os dispositivos e a proteção do sistema foi otimizado com a utilização integrada do ATP e do MATLAB, considerando que sem essa integração a quantidade de casos simulados e analisados se tornaria restrita e muito onerosa. Verificou-se que a falta de utilização de dispositivos de proteção contra surtos em sistemas de baixa tensão pode colocar em risco a integridade da instalação e a correta operação do sistema, tais como os relacionados à segurança de equipamentos e pessoas. Evidencia-se, assim, a importância de um método de seleção de dispositivos de proteção contra surtos para sistemas de baixa tensão.

Ao final, ressalta-se que a definição do conjunto de proteção com maior relevância para o sistema não levou em consideração os aspectos econômicos, apenas o desempenho operacional das proteções.

5.2 Trabalhos futuros

Algumas recomendações podem ser feitas para aprimorar o presente método. Ao longo do trabalho percebeu-se que a modelagem dos componentes no ambiente do ATPDraw tornou complexo o processo de criação de novas configurações de arranjos. A modelagem dos componentes em formato de *cards*, criando-se bibliotecas diretamente no ATP (arquivos.lib) para cada componente tornaria possível a inserção ou a retirada destes de forma mais fácil do sistema, aumentando assim, as variações de combinações que poderiam ser geradas pelo MATLAB.

Diante da influência das diversas variáveis pertencentes ao sistema sobre a sua proteção e coordenação dos dispositivos, faz-se necessário a busca por modelagens mais precisas, que levem em consideração, por exemplo, a resistência e o tipo de aterramento da instalação. Uma análise integrada entre o sistema de média tensão e baixa tensão de uma instalação também poderia ser proposta em novos trabalhos, tornando o estudo e a busca de soluções mais robustas e abrangentes.

Referências

- 1 SRETEN, S. VLADAN, R. Optimization and Protective Distance of Surge Protective Devices in Low-Voltage AC Circuits. *46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, 2011.
- 2 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE C62.41.1-2002: Guide on the Surge Environment in Low-Voltage (1000V and Less) AC Power Circuits. EUA, 2003.
- 3 WOOD, R.T. EWING, P.D. KORSAH, K. KERCEL, S. W. Electromagnetic Compatibility in Nuclear Power Plants, ORNL, Disponível em: <http://web.ornl.gov/ornlhome/publications_listing_cpapr.shtml>. Acesso em: 01 Jun. 2016.
- 4 U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. NUREG/CR-6866: Technical Basis for Regulatory Guidance on Lightning Protection in Nuclear Power Plants. EUA, 2006.
- 5 JANG, H. S. KIM, B. R. LEE, S. K. Efficiency and Probability Analysis of Lightning Protection System at Korean Nuclear Power Plant. *46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, 2011.
- 6 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. IAEA SSG-34: Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants, p. 41-42. Austria, 2016.
- 7 PETREANGELI, G. *Nuclear Safety*: Chapter 20 - Operation Experience. Oxford: Butterworth Heinemann (BH), 2006. p. 201-207.
- 8 MACLAREN, M. Lightning Disturbance on Distribution Circuits. *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 42, p. 280-287, 1923.
- 9 IEEE COMMITTEE REPORT. Bibliography on Surge Voltages in AC Power Circuits Rated 600 Volts and Less. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-89, p. 1056-1061, 1970.
- 10 LIAO, T. LEE, T. H. Surge Suppressors for the Protection of Solid-State Devices. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, v. IGA-2, p. 44-52, 1966.
- 11 MARTZLOFF, F. D. Surge Protection Techniques in Low-Voltage AC Power Systems, *International Telecommunication Energy Conference (INTELEC)*, p. 86-93, 1979.
- 12 MARTZLOFF, F. D. Varistor Versus Environment: Winning the Rematch, *IEEE Transactions On Power Delivery*, v. 1, p. 59-66, 1986.
- 13 MARTZLOFF, F. D. Coordination of Surge Protectors in Low-Voltage AC Power Circuits, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-99, p. 129-133, 1980.

-
- 14 MARTZLOFF, F. D. LEDDY, T. F. Selecting Varistor Clamping Voltage: Lower is Not Better!, *International Zurich Symposium on EMC*, 1989.
 - 15 STANDLER, R. B. Equations for Some Transient Overvoltage Test Waveforms, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 30, p. 69-71, 1988.
 - 16 STANDLER, R. B., Coordination of Surge Arresters and Suppressors for Use on Low-Voltage Mains, *International Zurich Symposium on EMC*, 1991.
 - 17 STANDLER, R. B. Transmission Line Models for Coordination of Surge-Protective Devices, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, p. 358-362, 1993.
 - 18 STANDLER, R. B. Calculations of Lightning Surge Currents inside Buildings, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, p. 195-199, 1992.
 - 19 MARZ, M. B. MENDIS, S. R. Protecting Load Devices from the Effects of Low-Side Surges, *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, p. 15-12, 1992.
 - 20 LAI, J. S. MARZLOFF, F. D. Coordinating Cascaded Surge Protection Devices: High-Low versus Low-High. *IEEE Transaction on Industry Applications*, v. 29, n. 4, 1993.
 - 21 ROUSSEAU, A.; PERCHE, T. Coordination of Surge Arresters in the Low Voltage Field, *International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, p. 119-125, 1995.
 - 22 PAUL, D. Light Rail Transit DC Traction Power System Surge Overvoltage Protection. *IEEE Transaction on Industry Applications*, v. 38, n. 1, 2002.
 - 23 LI, M. YUAN, J. ZHAO, Z. Low-Voltage SPD Coordination Analysis, *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*, p. 913-916, 2011.
 - 24 SRETEN, S. VLADAN, R. Effective Protection Distance from Cascade Coordinated Surge Protective Devices to Equipment in Low-Voltage AC Power Circuits. *43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2008.
 - 25 SRETEN, S. VLADAN, R. Analysis of Surge Protection Performance in Low Voltage AC Systems with Capacitive Load, *45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2010.
 - 26 U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. NUREG/CR-5609: Electromagnetic Compatibility Testing for Conducted Susceptibility Along Interconnecting Signal Lines. EUA, 2003.
 - 27 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-5: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and Measurement Techniques – Surge Immunity Test. 2005.

-
- 28 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-12: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-12: Testing and Measurement Techniques – Ring Wave Immunity Test. 2014.
 - 29 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-9: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-9: Testing and Measurement Techniques – Impulse Magnetic Field Immunity Test. 2016.
 - 30 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62305-1: Protection Against Lightning – Part 1: General Principles. 2010.
 - 31 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62305-2: Protection Against Lightning – Part 2: Risk Management. 2010.
 - 32 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62305-3: Protection Against Lightning – Part 3: Physical Damage to Structures and life Hazard. 2010.
 - 33 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62305-4: Protection Against Lightning – Part 4: Electrical and Electronic Systems within Structures. 2010.
 - 34 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61643-12: Low-Voltage Surge Protective Devices – Part 12: Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems – Selection and Application Principles. 2008.
 - 35 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE C62.41.2-2002: Recommended Practice on Characterization of Surge in Low-Voltage (1000V and Less) AC Power Circuits. EUA, 2003.
 - 36 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE C62.45: Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1000V and Less) AC Power Circuits. EUA, 2003.
 - 37 INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. CIGRE WG C4.408: Lightning Protection of Low-Voltage Networks, CIGRE Technical Brochure, nº 550, 2013.
 - 38 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ABNT 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2004 (versão corrigida 2008).
 - 39 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ABNT 5419-1: Proteção Contra Descargas Atmosféricas - Parte 1: Princípios Gerais. Rio de Janeiro, 2015.
 - 40 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ABNT 5419-2: Proteção Contra Descargas Atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de Risco. Rio de Janeiro, 2015.

-
- 41 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ABNT 5419-3: Proteção Contra Descargas Atmosféricas - Parte 3: Danos Físicos a Estruturas e Perigos à Vida. Rio de Janeiro, 2015.
 - 42 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ABNT 5419-4: Proteção Contra Descargas Atmosféricas - Parte 4: Sistemas Elétricos e Eletrônicos Internos na Estrutura. Rio de Janeiro, 2015.
 - 43 U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. RG 1.180: Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety-Related Instrumentation and Control Systems. EUA, 2003.
 - 44 U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Virginia Electric and Power Company, *License Event Report (LER) N°. 50-339/2010-004-00*, Virginia, 2010.
 - 45 PAUL, D. SRINIVASA I. V. Power Distribution System Equipment Overvoltage Protection. *IEEE Transaction on Industry Applications*, v. 30, n. 5, 1994.
 - 46 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61643-11: Low-Voltage Surge Protective Devices – Part 11: Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems – Requirements and Test Methods. 2011.
 - 47 SARTORI, C. A. F. (Orientador). Critérios Básicos para Elaboração de Estudos de Coordenação de Dispositivos de Proteção contra Surtos. São Paulo: CTMSP, 2002.
 - 48 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60664-1: Insulation Coordination for Equipment within Low-Voltage Systems – Part 1: Principles, Requirements and Tests. 2007.
 - 49 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61643-21: Low-Voltage Surge Protective Devices – Part 21: Surge Protective Devices Connected to Telecommunications and Signaling Networks – Performance Requirements and Test Methods. 2012.
 - 50 ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. EPRI: Handbook for Electromagnetic Compatibility of Digital Equipment in Power Plants - Fundamentals of EMI Control. EUA, 1994, v. 1, p. 5-20 a 5-30.
 - 51 TDK EPCOS. Data book do fabricante de SPD. Disponível em: <<https://en.tdk.eu/tdk-en/180382/tech-library/publications/protection-devices>>. Acesso em: 10 out. 2013.
 - 52 TDK EPCOS. Biblioteca de componentes do fabricante de SPD. Disponível em: <<https://en.tdk.eu/tdk-en/180524/design-support/design-tools>>. Acesso em: 10 out. 2013.
 - 53 PAUL, C. R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility: Chapter - Transmission Lines and Signal Integrity*, New Jersey, Wiley, 2006, p. 181-218.
 - 54 BASSI, W. Caracterização de equipamentos e instalações residenciais de baixa tensão aplicada ao estudo de transitórios de origem atmosférica. 2005. 108 f. Tese

- (Doutorado em Engenharia) apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- 55 GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems: Chapter – The Behavior of Winding under Transient Conditions*, New York, Willey, 1971, p. 279.
- 56 HOENIGMANN, W. F., Surge protection of AC motors - When are protective devices required. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. IA-19, nº 5, p. 836-843, 1983.
- 57 DAS, J. C. Surge transference through transformers. *IEEE Industry applications magazine*, v. 9, nº 5, 2003.
- 58 BASSI, W. Estudo de surtos em redes secundárias de distribuição devido a descargas atmosféricas diretas na rede primária. 1999. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- 59 KANASHIRO, A. G. Modelagem de transformadores de distribuição para altas frequências. 2001. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia) apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- 60 PRYSMIAN GROUP. Catálogo do fabricante de cabos elétricos. Disponível em: <br.prysmiangroup.com/br/files/dimensionamento_bt.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2016.
- 61 PERROTA, J. A. *Engenharia do Núcleo*. Curso de Introdução à Engenharia Nuclear. São Paulo: Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN), 2014. Notas de aula.
- 62 INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Ranking de Densidade de Descargas Atmosféricas dos Municípios Brasileiros. Disponível em: <www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/ranking.de.municipios.php>. Acesso em: 10 jan. 2016.
- 63 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 308: Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations. EUA, 2012.
- 64 CONDUMAX. Catálogo do fabricante de cabos elétricos. Disponível em: <<http://www.condumax.com.br/produtos/detalhe/134/48/catalogos-condumax>>. Acesso em: 10 jan. 2017.
- 65 WEG. Catálogo do fabricante de quadros elétricos. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h5a/ha2/WEG-quadros-eletricos-50029502-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2017.
- 66 UNIÃO TRANSFORMADORES. Catálogo do fabricante de transformador. Disponível em: <<https://www.transformadoresuniao.com.br/arquivos>>. Acesso em: 01 ago. 2017.

Anexo A

Biblioteca de Componentes modelada no ATPDraw

Neste anexo estão apresentadas as imagens das bibliotecas dos componentes modelados no ambiente do ATPDraw. Estas bibliotecas estão representadas na Figura 68 para os cabos elétricos; na Figura 69 para os equipamentos sensíveis; na Figura 70 pra os transformadores; e na Figura 71 e Figura 72 para os dispositivos de proteção contra surtos.

Figura 68 - Biblioteca dos cabos de alimentação

Foram utilizados os componentes LCC (*Line/Cable Constant*) que calculam os parâmetros do cabo a partir de dados de entrada como: dimensões, característica do material e meio de instalação. Diante disso, são gerados os componentes PCH, responsáveis por lerem a biblioteca do LCC e atribuir o comprimento das linhas.

Figura 69 - Biblioteca dos equipamentos sensíveis

Os equipamentos sensíveis foram modelados a partir da impedância de entrada de equipamentos submetidos a altas frequências, conforme item 3.2.3.1. Após a determinação do circuito equivalente, estes foram modelados em caixas fechadas com um terminal de entrada e um de saída utilizando-se a função *compress* do ATPDraw, facilitando desta forma, sua utilização nas simulações.

Figura 70 - Biblioteca de transformadores

Os transformadores foram implementados utilizando-se os modelos apresentados em 3.2.3.3, sendo realizado o mesmo processo de compressão do circuito equivalente descrito para os equipamentos sensíveis.

Figura 71 - Biblioteca de SPD – modelo “Leaded”

Figura 72 - Biblioteca de SPD – modelo “Block”

Os SPD foram implementados utilizando-se os dados disponibilizados pelo fabricante em [52], conforme apresentado em 3.2.1.1. O processo de compressão do circuito equivalente é o mesmo dos demais, utiliza-se a função *compress* do ATPDraw.

Anexo B

Sequência de Comutação das Chaves

A = Chave aberta; e

F = Chave fechada.

ARRANJO	LOCAL SURTO		GDG	CIRCUITOS OPERANDO						PROTEÇÕES OPERANDO							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
NPP001	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP002	F	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP003	F	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP004	F	A	A	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP005	F	A	A	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP006	F	A	A	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP007	F	A	A	F	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP008	F	A	A	A	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP009	F	A	A	A	A	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP010	F	A	A	A	A	A	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP011	F	A	A	A	A	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP012	F	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A	A
NPP013	F	A	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP014	F	A	A	F	A	A	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP015	F	A	A	F	F	A	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP016	F	A	A	F	F	F	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP017	F	A	A	F	F	F	F	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP018	F	A	A	F	F	F	F	F	A	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP019	F	A	A	F	F	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP020	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP021	F	A	A	A	A	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP022	F	A	A	A	A	A	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP023	F	A	A	A	A	A	A	F	F	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP024	F	A	A	A	A	A	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A	A
NPP025	F	A	A	F	A	A	A	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP026	F	A	A	F	F	A	A	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP027	F	A	A	F	F	F	A	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP028	F	A	A	F	F	F	F	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP029	F	A	A	F	F	F	F	F	A	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP030	F	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP031	F	A	A	A	A	A	A	A	A	F	F	F	A	A	A	A	A
NPP032	F	A	A	F	A	A	A	A	A	F	F	F	A	A	A	A	A
NPP033	F	A	A	F	F	A	A	A	A	F	F	F	A	A	A	A	A
NPP034	F	A	A	F	F	F	A	A	A	F	F	F	A	A	A	A	A

ARRANJO	LOCAL SURTO		GDG	CIRCUITOS OPERANDO						PROTEÇÕES OPERANDO								
	S1	S2		S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
NPP035	F	A	A	F	F	F	F	A	A	F	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP036	F	A	A	F	F	F	F	F	A	F	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP037	F	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP038	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP039	F	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP040	F	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP041	F	A	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP042	F	A	A	A	A	A	A	A	F	F	F	F	A	A	A	A	A	A
NPP043	F	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP044	F	A	A	F	F	F	A	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP045	F	A	A	F	F	F	F	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP046	F	A	A	F	F	F	F	F	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP047	F	A	A	F	F	F	F	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP048	F	A	A	A	F	F	F	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP049	F	A	A	A	A	F	F	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP050	F	A	A	A	A	A	F	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP051	F	A	A	A	A	A	A	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP052	F	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP053	F	A	A	F	F	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP054	F	A	A	F	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP055	F	A	A	F	F	F	F	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP056	F	A	A	F	F	F	F	F	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP057	F	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP058	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP059	F	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP060	F	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP061	F	A	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP062	F	A	A	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP063	F	A	F	F	F	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP064	F	A	F	F	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP065	F	A	F	F	F	F	F	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP066	F	A	F	F	F	F	F	F	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP067	F	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP068	F	A	F	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP069	F	A	F	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP070	F	A	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP071	F	A	F	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP072	F	A	F	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
NPP073	A	F	A	F	F	A	A	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP074	A	F	A	F	F	F	A	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP075	A	F	A	F	F	F	F	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP076	A	F	A	F	F	F	F	F	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F
NPP077	A	F	A	F	F	F	F	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F