

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AELFCLÊNITON MOURONER MACIEL DINIZ

**PROJETO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO DESLIGADOR AUTOMÁTICO
ELETROMECÂNICO PARA PARA-RAIOS DE MÉDIA TENSÃO**

**Novembro de 2017
Itajubá**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AELFCLÊNITON MOURONER MACIEL DINIZ

PROJETO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO DESLIGADOR AUTOMÁTICO

ELETROMECAÂNICO PARA PARA-RAIOS DE MÉDIA TENSÃO

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto

**Novembro de 2017
Itajubá**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AELFCLÊNITON MOURONER MACIEL DINIZ

PROJETO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO DESLIGADOR AUTOMÁTICO ELETROMECÂNICO PARA PARA-RAIOS DE MÉDIA TENSÃO

Tese aprovada por banca examinadora em 30 de Novembro de 2017, conferindo ao autor o título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Credson de Salles

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto (Orientador)

Prof. Dr. George Rossany Soares Lira

Prof. Dr. José Feliciano Adami

Prof. Dr. Paulo César Rosa

**Novembro de 2017
Itajubá**

Aos meus pais, Alexandre e Fátima.
A minha esposa, Ana Angélica, e a
minha filha, Mariana.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, coragem e fé;

Aos meus irmãos, tias, sobrinhos e amigos por sempre acreditarem;

Ao professor Martinez (*in memoriam*), pela oportunidade, confiança e pela disposição em colaborar e dividir seus ensinamentos;

Ao professor Estácio, pelo apoio, confiança e amizade;

A toda a equipe do Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luís Barreira Martinez, com quem tanto aprendi;

A AES Sul e a Capes pelo suporte financeiro;

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

Os para-raios de distribuição são amplamente utilizados na proteção contra sobretensões transitórias nas redes de média tensão. A operação correta dos para-raios deve ser assegurada para evitar falhas inesperadas. Devido à grande quantidade desses equipamentos em redes de média tensão, eles são conectados em série com um desligador automático que deve atuar para níveis elevados de degradação ou quando o para-raios é submetido a correntes acima da sua capacidade de absorção de energia, indicando a necessidade de sua substituição. Os desligadores automáticos dos para-raios de distribuição operam devido à presença de agentes explosivos, dando origem a uma série de problemas operacionais que provocam risco de acidentes aos transeuntes em virtude do lançamento indesejado de fragmentos. A utilização destes dispositivos provoca a retirada precoce de para-raios do sistema ainda em boas condições operacionais. Dessa forma, condena-se o componente principal pela atuação indevida de um acessório. Considerando os problemas associados aos desligadores convencionais, surgiu a necessidade de melhorar a proteção de transformadores instalados em redes de média tensão. Sendo assim, o objetivo da presente tese é apresentar o desenvolvimento de um novo projeto de desligador automático. O novo desligador, denominado de desligador eletromecânico, foi desenvolvido utilizando novos materiais e técnicas estatísticas de análise de taxa de falhas, resultando em um dispositivo de menor custo e mais adequado para as redes de distribuição brasileiras. Sua parte ativa compreende essencialmente um elemento fusível especial que permite atuações precisas frente a surtos de origem atmosférica, de manobra e correntes na frequência industrial. Em virtude disso, não opera através de uma explosão sendo considerado um dispositivo seguro para equipamentos e transeuntes locais. A partir da análise do desempenho do desligador eletromecânico e do desligador convencional, notou-se que apenas o novo desligador opera corretamente quando submetido às condições de serviço previstas nas normas vigentes. Portanto, a utilização do desligador eletromecânico, além de garantir a confiabilidade da proteção de transformadores contra surtos, tem influência direta na gestão de ativos da concessionária, reduzindo índices de falha, custos com manutenção e tarifas.

Palavras-chave: para-raios de óxido metálico, desligador automático eletromecânico, elo fusível, método dos acréscimos e decréscimos, corrente de descarga, risco de falha.

ABSTRACT

Distribution surge arresters are widely used for the protection of distribution lines against transient overvoltages. Their correct operation must be assured to avoid unexpected failures. Due to the large amount of these equipments in medium voltage networks, they are connected in series with a disconnecter that must actuate for stages of degradation of the arresters or when currents above the arrester limits are observed, indicating the necessity to replace the arrester. Conventional automatic disconnectors operate due to the presence of explosive agents, resulting in a number of operational problems causing risk of accidents to passers-by due to the unwanted release of fragments. The use of these devices causes early replacement of arresters from the system still in good operational conditions. As consequence, the arrester is condemned due to improper actuation of an accessory. Considering the problems associated with conventional disconnectors, it is proposed an improvement of overall the protection of transformers based on the utilization of arresters. Therefore, the aim of this thesis was the evaluation of the performance of distribution arresters and their disconnectors and develop a new automatic disconnector design. The new disconnector, called the electromechanical disconnector, was developed using new materials and statistical techniques of failure rate analysis, resulting in a lower cost and more suitable device for the Brazilian distribution networks. Its active part essentially comprises a special fuse element that allows precise actuations in front of lightning, switching currents and 60 Hz currents. It is also considered a safe device for local equipment and bystanders as it does not operate through an explosion. From the analysis of the performance of the electromechanical disconnector and the conventional one, it was noticed that only the new design operates correctly when subjected to the duty conditions provided in the current norms. Therefore, the use of the electromechanical disconnector, in addition to guaranteeing the reliability of transformer surge protection, presenting a direct influence on the management of assets, reducing fault rates, maintenance costs and tariffs.

Keywords: metal oxide surge arresters, electromechanical disconnector, fuse link, up-and-down method, discharge current, risk of failure.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO.....	15
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	17
1.2 - HIPÓTESE.....	17
1.3 - OBJETIVOS.....	18
1.4 - ESTRUTURA DA TESE.....	18

CAPÍTULO 02

PARA-RAIOS: UM BREVE HISTÓRICO.....	19
2.1 - COMENTÁRIOS.....	27

CAPÍTULO 03

O PARA-RAIOS DE MÉDIA TENSÃO.....	28
3.1 - O VARISTOR DE ÓXIDO METÁLICO.....	28
3.1.1 - PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS VARISTORES DE ÓXIDO METÁLICO.....	30
3.1.2 - COMPORTAMENTO TÉRMICO.....	32
3.1.3 - CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA.....	34
3.1.4 - PROCESSO DE FALHA.....	34
3.1.5 - DIMENSIONAMENTO DO PARA-RAIOS.....	35
3.1.5.1 - TENSÃO NOMINAL (U_R).....	36
3.1.5.2 - MÁXIMA TENSÃO DE OPERAÇÃO CONTÍNUA (MCOV).....	36
3.1.5.3 - CORRENTE DE REFERÊNCIA.....	36
3.1.5.4 - TENSÃO DE REFERÊNCIA.....	36
3.1.5.5 - CORRENTE DE DESCARGA.....	36
3.1.5.6 - CORRENTE DE DESCARGA NOMINAL (I_N).....	36
3.1.5.7 - TENSÃO RESIDUAL.....	37
3.2 - O DESLIGADOR AUTOMÁTICO CONVENCIONAL.....	37
3.2.1 - PROJETOS USUAIS DOS DESLIGADORES AUTOMÁTICOS CONVENCIONAIS.....	39
3.2.1.1 - DESLIGADOR COM CENTELHADOR SÉRIE.....	39
3.2.1.2 - DESLIGADOR COM CENTELHADOR EM PARALELO COM RESISTOR.....	40
3.2.1.3 - DESLIGADOR COM CENTELHADOR EM PARALELO COM BOBINA DE BLOQUEIO.....	41
3.2.1.4 - DESLIGADOR COM CARGA EXPLOSIVA EM CURTO-CIRCUITO.....	41
3.3 - COMENTÁRIOS.....	42

CAPÍTULO 04

DELIMITAÇÃO DO TEMA	43
4.1 - SOBREDIMENSIONAMENTO DOS PARA-RAIOS.....	43
4.2 - A ATUAÇÃO DO DESLIGADOR CONVENCIONAL	44
4.3 - PROPOSTA DO TRABALHO.....	52
4.4 - COMENTÁRIOS	54

CAPÍTULO 05

DESLIGADOR AUTOMÁTICO ELETROMECHANICO	55
5.1 - ENSAIOS NO DESLIGADOR CONVENCIONAL	56
5.2 - PROPOSTA DO DESLIGADOR ELETROMECHANICO.....	58
5.3 - ENSAIOS REALIZADOS EM ELOS FUSÍVEIS CONVENCIONAIS	59
5.4 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO DESLIGADOR	63
5.4.1 - AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS DE “UP-AND-DOWN”	64
5.4.2 - COMPORTAMENTO DO DESLIGADOR ELETROMECHANICO FRENTE À CORRENTES NA FREQUÊNCIA INDUSTRIAL	70
5.4.3 - ENSAIO DE TENSÃO DE RÁDIO INTERFERÊNCIA - RIV	71
5.4.4 - ENSAIO DE ENVELHECIMENTO SOB TENSÃO DE OPERAÇÃO SIMULANDO CONDIÇÕES AMBIENTAIS	72
5.5 - COMENTÁRIOS	73

CAPÍTULO 06

INFLUÊNCIA DO DESLIGADOR AUTOMÁTICO NO DESEMPENHO DO PARA-RAIOS.....	74
6.1 - NATUREZA ESTATÍSTICA DAS CORRENTES.....	75
6.2 - SUPORTABILIDADE FRENTE À CORRENTES ELEVADAS DE CURTA DURAÇÃO	78
6.3 - RISCO DE FALHA	80
6.3.1 - RISCO DE FALHA 1	81
6.3.2 - RISCO DE FALHA 2.....	84
6.3.3 - RISCO DE FALHA 3	87
6.3.4 - RISCO DE FALHA 4.....	92
6.4 - COMENTÁRIOS	100

CAPÍTULO 07

CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
7.1 - SOBRE A HIPÓTESE INICIAL.....	102
7.2 - CONCLUSÕES	102
7.3 - TRABALHOS FUTUROS	105
7.4 - PUBLICAÇÕES.....	105

CAPÍTULO 08

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
ANEXO 1	111
ANEXO 2	114

NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

AIEE – *American Institute of Electrical Engineers*;

ZnO – Óxido de Zinco;

A – Ampère;

I_t – Corrente de fuga total;

I_R – Componente resistiva da corrente de fuga;

I_c – Componente capacitiva da corrente de fuga;

θ_{op} – Temperatura de operação;

$\theta_{est.}$ – Temperatura limite de estabilidade;

kJ/kV – Energia específica do para-raios;

I_i – Intensidade de um impulso de corrente (kA);

$I_{d(50\%)}$ – Corrente de ruptura com 50% de probabilidade (kA);

σ – Desvio padrão;

$n_v I_v$ – Número de aplicações de impulsos com intensidade de corrente I_i ;

ΔI – Degrau de corrente utilizado no ensaio de “*Up-and-Down*” (kA);

$I_{mín}$ – Limite inferior da corrente de ruptura (kA);

$I_{máx}$ – Limite superior da corrente de ruptura (kA);

RIV – *Radio Interference Voltage* (μV);

SiC – Carboneto de Silício;

V – Tensão de carga do gerador (kV);

I – Corrente medida ou corrente de descarga (kA);

X – Indica a ruptura do dispositivo durante o ensaio de “*Up-and-Down*”;

O – Indica que o dispositivo submetido ao ensaio de “*Up-and-Down*” suportou a aplicação do impulso de corrente;

EF – Elo fusível;

DC – Desligador Automático Convencional;

DE – Desligador Automático Eletromecânico;

$P_{LN}(I)$ – Função densidade de probabilidade *Log-Normal*;

μ – Fator de forma;

σ – Fator de escala;

$P_w(I)$ – Função de distribuição acumulada *Weibull*;

η – Constante da distribuição de *Weibull* simétrica;

R_{falha} – Risco de falha do para-raios;

$D_{PS}(I)$ – Função densidade de probabilidade das correntes descarregadas nos para-raios;

$S_{PR}(I)$ – Função acumulada de probabilidade relacionada à suportabilidade do para-raios;

R'_{falha} – Risco de falha do para-raios associado ao desligador automático;

$S_{DA}(I)$ – Função acumulada de probabilidade relacionada à suportabilidade do desligador automático;

V_1 e V_2 – Varistores de óxido metálico com características elétricas distintas.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Fig. 2.1 - Para-raios desenvolvido na década de 1840.	20
Fig. 2.2 - Primeiro para-raios do sistema de potência.	21
Fig. 2.3 - Para-raios tipo “ <i>Horned Gapped</i> ”.	22
Fig. 2.4 (a) - Para-raios eletrolítico.....	24
Fig. 2.5 - Desenho de um para-raios tipo filme óxido.....	25

CAPÍTULO 3

Fig. 3.1 (a) - Varistores de óxido metálico.	29
Fig. 3.2 - Circuito equivalente de um varistor de óxido metálico.	30
Fig. 3.3 - Curva característica típica de um varistor.....	31
Fig. 3.4 - Características Dissipada e Consumida versus Temperatura para um varistor de óxido metálico.	33
Fig. 3.5 - Desenho de um para-raios de distribuição acoplado em série com um desligador automático.	38
Fig. 3.6 - Desenho do desligador automático convencional.....	38
Fig. 3.7 (a) - Desligador automático convencional antes de atuar..	39
Fig. 3.8 - Esquema típico de um desligador automático.	39
Fig. 3.9 - Esquema do desligador com centelhador série.....	40
Fig. 3.10 - Esquema do desligador com centelhador em paralelo com resistor..	41
Fig. 3.11 - Esquema do desligador com centelhador em paralelo com bobina de bloqueio. . .	41
Fig. 3.12 - Esquema do desligador com carga explosiva em curto-circuito.....	42

CAPÍTULO 4

Fig. 4.1 - Fotografia de um desligador automático convencional antes e após a atuação.	49
Fig. 4.2 - Fotografia de um desligador automático convencional antes e após a atuação.....	50
Fig. 4.3 - Esquemas de ligação do para-raios na proteção do transformador.....	51

CAPÍTULO 5

Fig. 5.1 - Curva característica “Tempo versus Corrente na frequência industrial” do desligador automático convencional.	58
Fig. 5.2 (a) - Desenho em 2D da proposta inicial do desligador eletromecânico.....	58
Fig. 5.3 - Curvas características “tempo versus corrente na frequência fundamental”	60
Fig. 5.4 - Esquema de ligação envolvendo o para-raios, a chave fusível e o transformador....	61
Fig. 5.5 - Evolução do invólucro do desligador eletromecânico.	63
Fig. 5.6 (a) - Desligador eletromecânico.	63
Fig. 5.7 - Desligador eletromecânico antes e depois da atuação.	65
Fig. 5.8 - Gráfico da função de distribuição cumulativa (FDC) <i>Weibull</i> relativo ao desligador serviço leve.	66
Fig. 5.9 - Gráfico da função de distribuição cumulativa (FDC) <i>Weibull</i> relativo ao desligador serviço normal.	67
Fig. 5.10 - Gráfico da função de distribuição cumulativa (FDC) <i>Weibull</i> relativo ao desligador serviço pesado.	69
Fig. 5.11 - Curvas de suportabilidade dos desligadores automáticos.....	69
Fig. 5.12 - Curvas características de fusão “Tempo x Corrente” relativas aos desligadores....	71
Fig. 5.13 (a) - desligadores eletromecânicos conectados aos para-raios	72
Fig. 5.14 (a) - desligador eletromecânico.	73

CAPÍTULO 6

Fig. 6.1 - Marcas em centelhadores provocadas por descargas atmosféricas.....	75
Fig. 6.2 - Probabilidade acumulada das descargas atmosféricas na região de concessão da AES Sul.	76
Fig. 6.3 - Curva da função densidade da distribuição log-normal elaborada com base nas amplitudes das correntes descarregadas nos para-raios.....	77
Fig. 6.4 - Curva de probabilidade acumulada relativa à suportabilidade do para-raios de 5 kA - serviço normal.	79
Fig. 6.5 - Risco de falha de um para-raios de 5 kA - serviço leve.....	82
Fig. 6.6 - Risco de falha de um para-raios de 5 kA - serviço normal.....	83
Fig. 6.7 - Risco de falha de um para-raios de 10 kA - serviço pesado.	83
Fig. 6.8 - Varistor com o isolamento externo danificado após a aplicação do impulso de corrente.	85
Fig. 6.9 - Risco de falha relativo ao varistor V_1	85

Fig. 6.10 - Suportabilidade do Para-raios de 5 kA versus Suportabilidade do Varistor V_1	86
Fig. 6.11 - Risco de falha relativo ao varistor V_2	87
Fig. 6.12 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DC_1	88
Fig. 6.13 - Risco de falha do varistor V_1 associado ao desligador DC_1	88
Fig. 6.14 - Suportabilidade do Varistor V_2 versus Suportabilidade do Desligador DC_1	89
Fig. 6.15 - Risco de falha do varistor V_2 associado ao desligador DC_1	89
Fig. 6.16 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DC_2	90
Fig. 6.17 - Risco de falha do varistor V_1 associado ao desligador DC_2	91
Fig. 6.18 - Suportabilidade do Varistor V_2 versus Suportabilidade do Desligador DC_2	91
Fig. 6.19 - Risco de falha do varistor V_2 associado ao desligador DC_2	92
Fig. 6.20 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DE_1	93
Fig. 6.21 - Risco de falha do varistor V_1 associado ao desligador DE_1	94
Fig. 6.22 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DE_2	95
Fig. 6.23 - Risco de falha do varistor V_1 associado ao desligador DE_2	95
Fig. 6.24 - Suportabilidade do Varistor V_2 versus Suportabilidade do Desligador DE_2	96
Fig. 6.25 - Risco de falha do varistor V_2 associado ao desligador DE_2	96
Fig. 6.26 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DE_3	97
Fig. 6.27 - Risco de falha do varistor V_1 associado ao desligador DE_3	98
Fig. 6.28 - Suportabilidade do Varistor V_2 versus Suportabilidade do Desligador DE_3	98
Fig. 6.29 - Risco de falha do varistor V_2 associado ao desligador DE_3	99
Fig. 6.30 - Influência dos desligadores no desempenho do varistor V_1	99
Fig. 6.31 - Influência dos desligadores no desempenho do varistor V_2	100

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Número de falhas por ano em desligadores convencionais.....	45
Tabela 4.2 - Medições de impedâncias internas de desligadores convencionais.	47
Tabela 4.3 - Resultado do ensaio de “ <i>Up and Down</i> ” realizado em desligadores convencionais.	49
Tabela 4.4 - Medições da Tensão de Radio Interferência em desligadores convencionais.....	50

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - <i>Up-and-Down</i> em desligadores automáticos convencionais.....	57
Tabela 5.2 - Valores de corrente de ruptura obtidos dos ensaios de “ <i>Up-and-Down</i> ” realizados nos elos fusíveis e no desligador convencional.	59
Tabela 5.3 - Valores de Corrente, em kA, obtidos no ensaio de “ <i>Up-and-Down</i> ” realizado em elos fusíveis.	62
Tabela 5.4 - <i>Up-and-Down</i> no desligador eletromecânico do tipo serviço leve.	65
Tabela 5.5 - <i>Up-and-Down</i> no desligador eletromecânico do tipo serviço normal.....	67
Tabela 5.6 - <i>Up-and-Down</i> no desligador eletromecânico do tipo serviço pesado.....	68
Tabela 5.7 - Valores de corrente de ruptura obtidos dos ensaios de “ <i>Up-and-Down</i> ” realizados nos desligadores eletromecânicos <i>serviço leve, serviço normal e serviço pesado</i>	70

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 - Valores de referência do risco de falha.	84
Tabela 6.2 - Resultado do ensaio de “ <i>Up-and-Down</i> ” realizado em varistores de óxido metálico.	85

ANEXO 1

Tabela A1. 1 - <i>Up-and-Down</i> em elos fusíveis do grupo EF ₁	112
Tabela A1. 2- <i>Up-and-Down</i> em elos fusíveis do grupo EF ₂	112
Tabela A1. 3 - <i>Up-and-Down</i> em elos fusíveis do grupo EF ₃	113
Tabela A1. 4- <i>Up-and-Down</i> em elos fusíveis do grupo EF ₄	113

ANEXO 2

Tabela A2. 1- <i>Up-and-Down</i> em elos fusíveis do grupo $EF_{(B)1}$	115
Tabela A2. 2- <i>Up-and-Down</i> em elos fusíveis do grupo $EF_{(B)2}$	115
Tabela A2. 3- <i>Up-and-Down</i> em elos fusíveis do grupo $EF_{(B)3}$	116
Tabela A2. 4- <i>Up-and-Down</i> em elos fusíveis do grupo $EF_{(B)5}$	116
Tabela A2. 5- <i>Up-and-Down</i> em elos fusíveis do grupo $EF_{(B)6}$	117

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição normalmente está sujeito à ocorrência de várias formas de fenômenos transitórios, envolvendo variações súbitas de tensão e de corrente provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores e chaves seccionadoras. Para manter o sistema de distribuição cada vez mais confiável e econômico, equipamentos relativos à proteção contra estes fenômenos estão cada vez mais em evidência.

Os para-raios, ou supressores de surtos, são os equipamentos mais utilizados na proteção contra sobretensões transitórias em redes de média e alta tensão. Os mais modernos apresentam uma estrutura relativamente simples. São compostos basicamente pelo empilhamento de pastilhas cerâmicas de óxido metálico (varistores) e um invólucro polimérico.

Estes equipamentos, quando bem dimensionados e em boas condições operacionais, devem evitar o aumento de sobretensões para valores superiores ao nível básico de isolamento dos transformadores e outros elementos da linha. Caso contrário, os para-raios podem afetar a confiabilidade da linha ou a integridade do transformador, uma vez que não será capaz de manter níveis seguros de tensão residual ou tornar-se-á uma fonte de falta fase-terra. Normalmente, os danos causados aos para-raios são oriundos dos seguintes fatores:

- Correntes elevadas de curta duração;
- Correntes de baixa amplitude e longa duração;
- Corrente de fuga;
- Excessivo número de descargas.

As correntes elevadas de curta duração e as de baixa amplitude e longa duração são provenientes das descargas atmosféricas e de manobra, respectivamente. Essas correntes podem provocar a falha prematura dos para-raios tornando-o, em alguns casos, um circuito-aberto ou um curto-circuito.

A corrente de fuga também contribui com o envelhecimento dos para-raios. Uma vez que esse equipamento é instalado no sistema do terminal de fase para terra, em bom estado de operação é percorrido por uma corrente de fuga na ordem de microampères. Isso provoca uma degradação contínua, mas lenta, ou seja, um envelhecimento natural dos varistores de óxido metálico. Além disso, o excessivo número de descargas também irá provocar o envelhecimento natural dos varistores, resultando na elevação da corrente de fuga.

Associado em série ao para-raios, há ainda o desligador automático. Sua função é desconectar o para-raios do sistema quando o ele é submetido a solicitações acima da sua capacidade ou apresenta níveis de degradação que resultam em correntes elevadas. Dessa forma, o desligador atuado funciona como sinalizador de uma operação severa ou degradação avançada do para-raios, indicando a necessidade de sua substituição.

Ensaio realizados no Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luís Barreira Martinez mostram que os desligadores automáticos convencionais apresentam níveis aleatórios de atuação e, normalmente, são propensos a falhas mesmo quando submetidos a correntes de descarga nominal.

Além disso, quando se observa o mercado nacional de para-raios para redes de distribuição, verifica-se a ausência de uma definição científica dos motivos que levam a certas práticas relativas à sua especificação e instalação. Por um lado, existe o senso comum de que as correntes de descarga são elevadas, fato não observado durante o desenvolvimento de pesquisas envolvendo esse tema [1, 2]. Por outro lado, constata-se em laboratório o desempenho inadequado dos desligadores automáticos ocasionando a substituição de para-raios ainda em condições operacionais. Em geral, nota-se que a aplicação de acordo com tendências, sem critérios técnicos, tem conduzido à especificação de para-raios com níveis de energia elevados dotados de desligadores automáticos com desempenho duvidoso.

A atuação do desligador automático convencional é realizada por meio de elementos explosivos, resultando em diversos problemas operacionais e gerando risco de acidentes aos transeuntes em virtude do lançamento indesejado, em alta velocidade, de fragmentos, assim como danos a equipamentos próximos. Além disso, os resultados dos ensaios mostraram que alguns desligadores convencionais são propensos a falhas mesmo submetidos à corrente de descarga nominal.

Considerando os problemas associados aos desligadores convencionais, a presente tese discorre sobre o desenvolvimento de um projeto de desligador automático de menor custo, utilizando novos materiais e técnicas estatísticas de análise de taxa de falhas, resultando em um produto mais adequado para as redes de distribuição brasileiras.

O novo desligador automático atende aos requisitos de máximas correntes previstas pelas normas devendo atuar apenas quando a substituição do para-raios for de fato necessária. Os resultados obtidos têm aplicação direta na gestão de ativos da concessionária, redução dos índices de falha, custo de manutenção e tarifas.

1.1 - Motivação

Para-raios sobredimensionados associados a desligadores ineficientes estão associados à substituição desnecessária destes equipamentos ou ainda, à ineficácia da sua operação, colocando em risco a integridade dos equipamentos que deveriam proteger e a continuidade da operação da rede. Representam, portanto, custos desnecessários às concessionárias e, conseqüentemente aos consumidores. Além disso, há a questão ambiental considerando-se o descarte dos para-raios, sobretudo os elementos varistores e os invólucros poliméricos.

Dessa forma, este trabalho é motivado pela busca de soluções que apresentam impacto nos custos e desempenho do sistema elétrico, refletindo em melhorias significativas na qualidade e operação do sistema elétrico.

1.2 - Hipótese

A rede de distribuição convencional no Brasil faz extensivo uso de para-raios sobredimensionados em termos de correntes de descarga e desligadores ineficientes com atuação aleatória ou ineficaz. Além disso, não se faz distinção entre a característica do para-raios e a sua associação a um desligador adequado, sendo utilizado o mesmo tipo de desligador para os diferentes tipos de para-raios. Isto permite que na rede sejam encontrados, em operação, para-raios na iminência de falha; ou fora de operação, para-raios em bom estado operacional.

A hipótese aventada nesta tese é a de que é possível, para resolver as questões acima, dimensionar um para-raios a um menor custo, baseado nas necessidades reais de corrente de descarga do sistema elétrico e associado a um desligador eficiente que atenda, em termos de suportabilidade, aos diferentes tipos de para-raios disponíveis para o sistema de distribuição. Comprovada esta possibilidade, é possível apresentar melhoria no desempenho do sistema elétrico, aumento no nível de proteção dos transformadores e redução de custos operacionais.

1.3 - Objetivos

Avaliar o desempenho da operação dos para-raios de média tensão em conjunto com seus desligadores e, com base nas necessidades reais do sistema elétrico, dimensionar adequadamente um conjunto para-raios/desligador e apresentar uma nova tecnologia de desligador em substituição aos elementos convencionais em uso.

1.4 - Estrutura da tese

O texto desta tese está dividido em oito capítulos, iniciando com a presente introdução. Na sequência, o Capítulo 2 trata da evolução dos para-raios. Através de um breve histórico foi possível discorrer desde os primeiros dispositivos desenvolvidos na década de 1840 até os projetos elaborados atualmente e, além disso, relatar a necessidade de melhorias na proteção contra surtos à medida que o sistema elétrico evoluía.

O Capítulo 3 discorre sobre o para-raios de média tensão e o desligador automático, abordando desde as características elétricas até os projetos desses equipamentos. No Capítulo 4 são abordadas as principais falhas atribuídas ao desligador automático e suas consequências, evidenciando a necessidade de um novo projeto para esse dispositivo.

No Capítulo 5 é apresentado o novo projeto do desligador automático. Será apresentado o desenvolvimento de três projetos de desligadores, bem como a análise do desempenho frente à correntes provenientes de surtos atmosféricos e na frequência industrial.

O Capítulo 6 apresenta um estudo sobre técnicas estatísticas de análise de taxa de falhas envolvendo projetos de desligadores automáticos convencionais e projetos dos desligadores automáticos propostos neste trabalho. Através dos resultados obtidos foi possível confrontar o desempenho dos diferentes projetos analisados, quando submetidos às condições de operação previstas nas normas vigentes, corroborando diversos problemas tratados no Capítulo 4.

No Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais e no Capítulo 8 estão reunidas todas as referências bibliográficas citadas durante o desenvolvimento do presente trabalho.

CAPÍTULO 02

PARA-RAIOS: UM BREVE HISTÓRICO

Desenvolvido no século XIX, o primeiro para-raios tinha a função de proteger as linhas de telégrafo contra as descargas atmosféricas. Tratava-se de um dispositivo relativamente simples, visto que o nível de potência de curto-circuito naquela época era muito baixo.

Na década de 80 do século XIX surgiram os primeiros sistemas elétricos de potência e à medida que o sistema foi evoluindo melhorias no projeto inicial do para-raios eram necessárias.

Entre o final do século XIX e início do século XX estão registradas na história três fases sobre a evolução dos para-raios, além de uma fase complementar de caráter altamente tecnológico que ocorreu no final da década de 1970. Todas elas estão associadas ao desenvolvimento da indústria da eletricidade [3].

- **Primeira fase:** Determinada pela evolução dos circuitos elétricos de telefonia cuja potência de curto-circuito era relativamente desprezível;
- **Segunda fase:** Determinada pela evolução dos sistemas elétricos de média tensão cuja potência de curto-circuito era reduzida. Tais como os sistemas de distribuição primária, iluminação e transporte;
- **Terceira fase:** Determinada pela evolução dos sistemas elétricos em alta tensão e elevada potência de curto-circuito como os sistemas de transmissão de potência;

- **Quarta fase:** Determinada pela evolução dos grandes sistemas de transmissão de potência, sistemas em corrente contínua e subestações blindadas. Portanto, a quarta fase é composta pelos sistemas elétricos em extra alta tensão cuja característica é o elevado nível de potência de curto-circuito.

Os primeiros sistemas de telégrafo foram desenvolvidos por volta de 1837. Em 1847 Joseph Henry publicou um artigo informando detalhes a respeito de um dispositivo que havia desenvolvido para ser utilizado nos postes de telégrafo. Sua invenção era composta por um fio aterrado junto à base do poste estando a outra extremidade do fio distante meia polegada da linha de telégrafo [4], como mostra a Fig. 2.1.



Fig. 2.1 - Para-raios desenvolvido na década de 1840 [4].

O dispositivo era de fato um centelhador, para o qual a rigidez dielétrica do ar permitia que o sinal de telégrafo fosse transmitido sem interferências. Na presença de uma descarga atmosférica, a sobretensão provocaria a ruptura do ar, de modo que a descarga seria escoada através do centelhador para a terra.

Como o sistema apresentava um nível de curto-circuito relativamente desprezível, tal dispositivo tinha um bom desempenho nas linhas telegráficas. Em virtude disso, era possível que o sistema retornasse às condições operativas iniciais sem a ajuda de um dispositivo complementar.

Embora o termo para-raios não tenha sido utilizado em seu artigo, sua invenção tem a descrição de um para-raios na fase inicial. Só em 1860 a primeira patente utilizando o termo para-raios foi emitida [4].

Com a criação da lâmpada elétrica, por Thomas Edison, surgiram também as linhas elétricas aéreas, bem como os sistemas de transporte. Em vista disso, os novos sistemas elétricos apresentavam níveis de tensão mais elevados provocando correntes de curto-circuito

para a terra subsequentes à atuação do centelhador. Essas correntes eram mais difíceis de controlar.

No decorrer dos anos essa corrente foi denominada de “corrente subsequente”. O desafio de controlar a corrente subsequente possivelmente tornou-se a maior motivação para o desenvolvimento dos para-raios durante as três primeiras décadas do século XX.

O controle da corrente subsequente permitia que o para-raios retornasse a sua condição operacional prévia possibilitando a sua adequada operação quando submetido a novos impulsos de corrente. A primeira solução colocada em prática foi aumentar o tamanho do próprio centelhador. Entretanto, os engenheiros da época observaram que para interromper a corrente subsequente era necessário inserir uma resistência em série com o centelhador.

Em 1887 foi obtida a patente referente ao desenvolvimento de um para-raios contendo uma resistência em série com o centelhador, conforme a Fig. 2.2 [4]. Este para-raios apresenta o cabo de terra conectado a um solenoide. Dessa forma, se o centelhador atuar devido a uma descarga atmosférica e for submetido à corrente subsequente, o solenoide será acionado e forçará a abertura de outro centelhador, representando a resistência em série. Com isso, o arco elétrico é alongado garantindo a sua interrupção durante a passagem da corrente pelo zero. Mas esse para-raios apresentava um problema operacional: era necessário “resetá-lo” após a ocorrência de uma descarga.

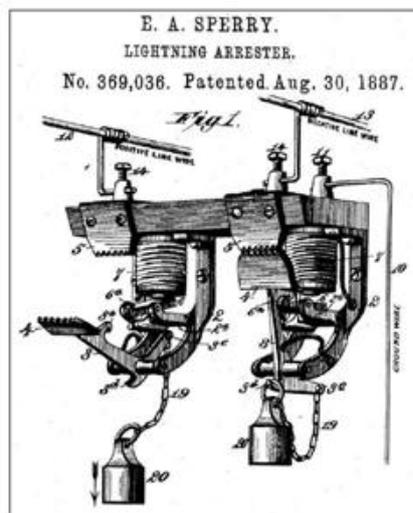


Fig. 2.2 - Primeiro para-raios do sistema de potência [4].

Outra solução encontrada para interromper a corrente subsequente foi utilizar um para-raios tipo “*Horned Gapped*”. A Fig. 2.3 mostra uma versão de 1896 desse dispositivo.

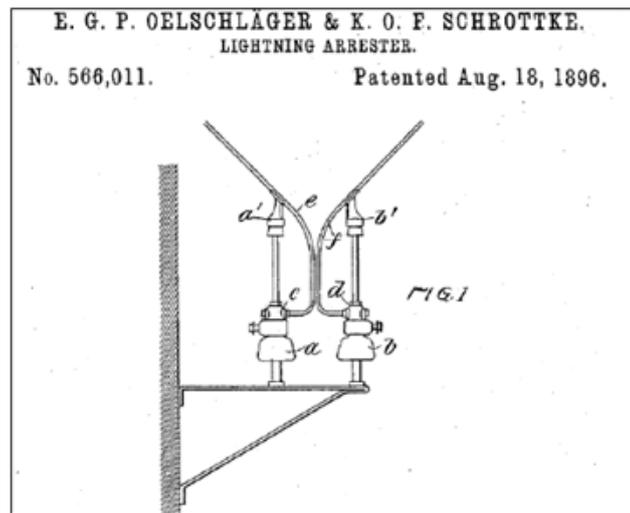


Fig. 2.3 - Para-raios tipo “*Horned Gapped*”[5].

A distância entre os eletrodos do centelhador aumentava da base até as extremidades forçando o alongamento do arco elétrico. Dessa forma, o valor da corrente subsequente era limitada a níveis que podiam levar a sua auto-extinção durante a passagem pelo zero.

A primeira investigação de cunho científico sobre o problema relacionado com a interrupção das correntes subsequentes foi reportada em maio de 1894, por A. J. Wurts, através do “*American Institute of Electrical Engineers - AIEE*”. O estudo envolveu conceitos sobre os fenômenos relacionados com os “*non arcing metals*”, ligas em zinco – cobre utilizadas pela maioria dos fabricantes de para-raios na construção de centelhadores. Esse material apresenta a propriedade de conduzir corrente em um sentido e exigir tensão extremamente elevada para conduzir no sentido contrário [3].

Os engenheiros da época também desenvolveram o “para-raios multi centelhadores”. Estes para-raios permaneciam em condução subsequente à descarga de um impulso de corrente por alguns semiciclos da tensão em frequência industrial. Com isso, sua aplicação era restrita aos circuitos em corrente alternada com baixa potência de curto-circuito. Sua principal desvantagem era o elevado nível de tensão residual e conseqüente nível elevado da tensão de proteção.

Esta situação resultou na necessidade de desenvolver uma resistência que fosse alta o suficiente para reduzir a corrente subsequente e adequadamente baixa para não resultar em um nível elevado da tensão residual. Portanto, era preciso substituir a resistência linear por uma resistência com característica não linear.

A resistência variável possibilitaria que o para-raios conduzisse correntes provenientes de descargas atmosféricas mais elevadas e interrompesse a corrente subsequente após o evento. Porém, nessa época a ciência dos materiais não apresentava recursos suficientes e os materiais semicondutores eram praticamente desconhecidos. A solução encontrada foi colocar em curto a resistência série através de multicentelhadores paralelos.

Os para-raios multicentelhadores apresentavam um desempenho adequado para baixos níveis de curto-circuito. Contudo, a partir do momento em que os níveis de curto-circuito dos sistemas elétricos começaram a crescer, principalmente após o advento das linhas de transmissão em alta tensão, esses para-raios começaram a falhar sistematicamente. Normalmente, devido à falha na interrupção da corrente subsequente.

Para evitar a ocorrência de uma série de fenômenos que resultavam nas falhas existentes nos para-raios multicentelhadores em sistemas elétricos em alta tensão, era preciso definir novas soluções para o resistor em série, bem como, para os centelhadores.

Entre os anos de 1906 e 1907, a disputa pelo domínio do mercado mundial de para-raios estava em pleno ritmo. O engenheiro da GE, Charles Steinmetz, havia acabado de construir o seu laboratório de alta tensão em Schenectady, Nova York. Ele poderia, pela primeira vez, simular descargas atmosféricas por meio de um banco de capacitores e realizar ensaios em para-raios [5].

Na mesma época, uma equipe de engenheiros da Westinghouse Electric estava fazendo grandes progressos em seus trabalhos. No entanto, em 07 de fevereiro de 1907 o engenheiro da GE, Elmer E. F. Creighton, registrou a primeira aplicação de um novo tipo de para-raios de alta tensão denominado de para-raios eletrolítico de células de alumínio [5].

O para-raios eletrolítico, ou para-raios em alumínio, consiste em células de alumínio onde cada célula é composta por duas placas de alumínio cobertas por uma película microscopicamente fina de hidróxido de alumínio. Quando a tensão é aplicada na célula e gradualmente aumentada, a corrente através da célula é muito pequena até um valor crítico de tensão ser alcançado. Nesse momento, a corrente percorre livremente sendo limitada apenas pela resistência interna da célula, a qual era muito baixa [6].

A Fig. 2.4 apresenta o desenho de um para-raios eletrolítico, bem como a fotografia de duas placas de alumínio.

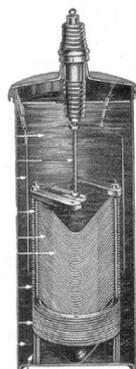


Fig. 2.4 (a) - Para-raios eletrolítico [6].

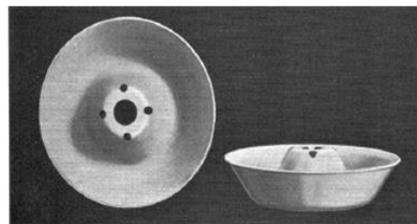


Fig. 2.4 (b) - Placas de alumínio [6].

O para-raios eletrolítico foi um grande avanço na proteção contra surtos, visto que não era necessário utilizar elementos em série para a extinção do arco elétrico. Este tipo de dispositivo promovia uma boa limitação de corrente, mas as tensões residuais eram altas e aleatórias, havendo ainda o inconveniente do tamanho exagerado do para-raios, custo elevado e procedimento de montagem extremamente laborioso. Além disso, a relação entre o equipamento protetor e o equipamento protegido era baixa. Portanto, sua aplicação ficou restrita as grandes subestações, onde predominou por mais de uma década [3, 5].

Em paralelo com o desenvolvimento do para-raios eletrolítico, um para-raios muito mais simples foi sendo desenvolvido. Esse para-raios foi denominado tipo expulsão.

Os para-raios tipo expulsão são constituídos basicamente por dois centelhadores montados em um tubo isolante e conectados em série. Seu princípio de funcionamento devia-se à presença de diferentes materiais dielétricos em seus centelhadores, resultando em distribuição de tensão não uniforme entre eles.

O início da disrupção ocorria no centelhador localizado na parte superior do para-raios, logo, toda a tensão passava a ser aplicada sobre o centelhador inferior, iniciando o processo de formação do arco em seu dielétrico. Este dielétrico gerava gases que provocavam a deionização do arco e a interrupção da corrente de frequência fundamental de forma natural quando da passagem da corrente pelo zero. No entanto, esses para-raios apresentavam vida útil relativamente curta e, em virtude disso, foram pouco utilizados.

Para competir com o para-raios tipo expulsão, foi desenvolvido pela *General Electric* o para-raios tipo filme óxido. Embora sua estrutura física também fosse composta de um centelhador em série com um resistor, seu componente básico era um composto químico em forma de pó que ao ser aquecido mudava sua característica de condutor para isolante.

Em 1915 o para-raios tipo filme óxido sofreu modificações visando operar no sistema de média tensão. A evolução foi dotada de um sistema tecnicamente denominado de “*pellet*” [3, 5].

As “*pellets*” são obtidas através do processamento e recobrimento de pequenas esferas de peróxido de chumbo, onde cada esfera se transforma em uma “célula de filme óxido”. Através desse sistema, foi possível obter custos compatíveis com os dos equipamentos protegidos. A Fig. 2.5 apresenta o desenho de um para-raios tipo filme óxido.

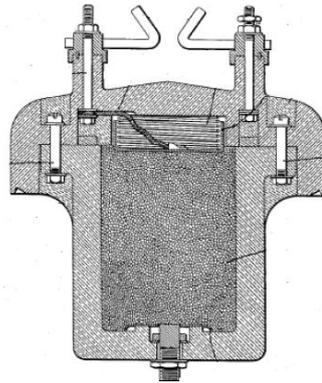


Fig. 2.5 - Desenho de um para-raios tipo filme óxido. Adaptado de [5].

Outro projeto que também teve o intuito de substituir o para-raios eletrolítico foi o para-raios *autovalve*. Porém, apresentava custo elevado e construção bastante elaborada [3].

No início da década de 1930 surgiram os resistores não lineares a carboneto de silício. Foram os primeiros corpos sólidos desenvolvidos que reuniam as principais características necessárias para a construção de para-raios compactos. Além do custo reduzido, seu desempenho era compatível com a crescente evolução dos sistemas elétricos.

Estes resistores apresentavam uma característica *tensão x corrente* que, quando associadas a um conjunto de centelhadores, promoviam a proteção contra surtos de maneira bem mais eficaz em relação aos para-raios até então utilizados. Com este tipo de para-raios obteve-se uma redução na tensão residual em cerca de 40%, além de uma redução de cerca de 30% na altura e 80% no volume em relação aos dispositivos anteriores [3].

Os primeiros para-raios a carboneto de silício foram construídos na forma multi unidades. Eram projetados com tensão nominal de 12 kV e permitiam que fossem realizadas inspeções periódicas [3].

Por volta de 1954, estes dispositivos foram aperfeiçoados com a introdução de centelhadores ativos. Estes centelhadores eram construídos em conjunto com uma bobina que promovia um campo magnético intenso na região de formação do arco elétrico. Este campo magnético tinha duas finalidades principais: alongar o arco e fazer com que ele se movesse

sobre a superfície do eletrodo, saindo do seu ponto inicial para um ponto de maior afastamento entre os seus terminais, facilitando, dessa forma, a sua extinção.

Ao passo que o sistema elétrico de potência evoluía, aumentava a dependência da proteção contra surtos de tensão sobre os para-raios. Com isso, a evolução dos para-raios era proporcional à evolução do sistema elétrico. Conseqüentemente, os para-raios eram sistematicamente monitorados no que resultava na descoberta de alguns pontos fracos apresentados por esses dispositivos.

O problema mais importante observado no para-raios a base de carboneto de silício foi o baixo desempenho frente a descargas de manobra, fenômeno extremamente importante nos grandes sistemas em extra e ultra-alta tensão em corrente alternada. Como agravante, esse problema também foi destacado em aplicações nos sistemas de corrente contínua e subestações blindadas [3].

Para-raios a base de carboneto de silício ainda são utilizados, com menor demanda, seja nas redes de distribuição rurais ou urbanas ou nas subestações. Porém, com a falta de evolução tecnológica aplicada a esses dispositivos eles estão cada vez mais em desuso.

Em meados da década de 1970 surgiram os varistores de óxido metálico. Dotados de alto grau de não linearidade, são capazes de suportar as elevadas tensões nominais dos sistemas elétricos sem a necessidade de uso de centelhadores. Esse novo material (empregado inicialmente na proteção de dispositivos eletrônicos) passou a ser utilizado na composição de supressores de surtos representando um grande avanço dado na proteção dos sistemas elétricos. Com eles, foi possível obter dispositivos com uma capacidade de dissipação de energia duas vezes maior que a promovida pelos dispositivos de carboneto de silício [7].

Na década de 1980 diversas empresas (japonesas, europeias e americanas) começaram a desenvolver e produzir para-raios de óxido metálico para aplicação em redes de distribuição. Neste período foram produzidos os primeiros para-raios com invólucro polimérico. Isto resultou em uma evolução tecnológica bastante significativa por que, até então, eram conhecidos apenas os para-raios com invólucro de porcelana.

A partir da década de 1990 as empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais do Brasil começaram a utilizar o para-raios de óxido metálico com invólucros poliméricos. Desde então, o processo de aquisição de para-raios poliméricos vem crescendo ano a ano, com uma grande quantidade de para-raios com invólucros poliméricos atualmente instalados em redes de distribuição, em linhas de transmissão e em subestações com tensões nominais até 500 kV [8].

2.1 - Comentários

Desde o surgimento dos para-raios, progressos eram necessários no intuito de manter o seu desempenho de acordo com as características do sistema elétrico. A presente tese trata de melhorias relativas aos para-raios de média tensão através de um novo conceito no projeto do desligador automático e sua associação a um para-raios dimensionado adequadamente às reais necessidades da rede.

CAPÍTULO 03

O PARA-RAIOS DE MÉDIA TENSÃO

O para-raios é um dispositivo de proteção do sistema elétrico cuja principal finalidade é limitar as amplitudes das sobretensões transitórias. Estas sobretensões são impostas nos terminais dos equipamentos a níveis pré-estabelecidos e operacionalmente aceitáveis.

Atualmente, o projeto mais elaborado de para-raios contempla o uso de varistores fabricados a base de óxido metálico. Tais dispositivos surgiram na década de 1970 e permitem suportar elevadas tensões nominais do sistema elétrico sem a necessidade de uso de centelhadores. Além disso, através deles foi possível obter dispositivos com uma capacidade de dissipação de energia duas vezes maior que a promovida pelos dispositivos de carboneto de silício, representando um grande avanço dado na proteção dos sistemas elétricos.

O presente capítulo trata do para-raios utilizado no sistema de média tensão, dando destaque ao varistor de óxido metálico e ao desligador automático convencional.

3.1 - O varistor de óxido metálico

Varistores são dispositivos semicondutores eletro-cerâmicos com características *corrente x tensão* não lineares. A palavra varistor é derivada do termo “*variable resistor*”. No entanto, os varistores também são conhecidos como resistores não lineares, resistores variáveis, supressores de surto e limitadores de tensão [9].

Os varistores são os componentes fundamentais dos para-raios. São cerâmicas obtidas através da sinterização de diversos compostos em particular o óxido de zinco, ZnO, e outros óxidos aditivos (alumínio, antimônio, bismuto e manganês). O processo de sinterização destes elementos resulta em uma estrutura com duas fases distintas, os grãos de óxido dispersos em

uma matriz intergranular composta pelos óxidos aditivos. Esta camada intergranular, ou seja, as camadas entre os grãos de ZnO, proporcionam ao material as características exclusivas do para-raios. As características dos varistores variam em função de sua composição e pureza [10]. A Fig. 3.1 mostra varistores de óxido metálico, bem como sua estrutura microscópica com os grãos de óxido metálico e camadas intergranulares.



Fig. 3.1 (a) - Varistores de óxido metálico.

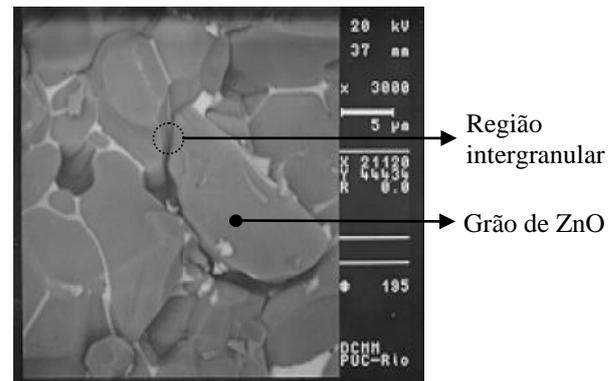


Fig. 3.1 (b) - Estrutura microscópica do varistor de óxido metálico [11].

A origem do comportamento não linear está relacionada com as características microestruturais dos varistores que são dependentes do tipo de processamento empregado e da natureza dos dopantes.

Os varistores de óxido metálico são preparados pela sinterização de grãos de ZnO, um semicondutor tipo n, na presença de pequenas quantidades de óxidos metálicos. Estes materiais passam por um processo de mistura e moagem até que as partículas atinjam o tamanho da ordem de 10^{-6} cm. Esta mistura é prensada no formato de pastilhas e sinterizada em fornos com tempo e temperatura programados. A pastilha já resfriada é então submetida a um processo de metalização de sua superfície e aplicação de um colar isolante em sua lateral. O disco varistor completo é recozido para proporcionar maior estabilidade das suas características no tempo [10]. Em seguida, cada varistor é ensaiado nas regiões de baixa e alta corrente determinando-se assim as suas características.

Concluído todo o processo, o varistor torna-se um material policristalino composto de grãos de ZnO, semicondutivo, com contornos de grãos bem definidos. A região intergranular apresenta características de materiais semicondutores de modo que a condução elétrica nos varistores pode ser explicada a partir da teoria de formação de barreiras de potencial [12]. O circuito elétrico simplificado do varistor é apresentado na Fig. 3.2. Nele é possível observar a corrente de fuga total (I_t) e suas componentes resistiva (I_r) e capacitiva (I_c).

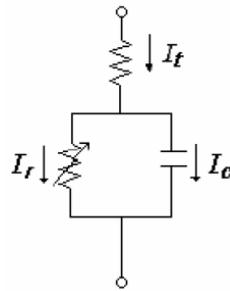


Fig. 3.2 - Circuito equivalente de um varistor de óxido metálico.

A componente resistiva representa a corrente que percorre a resistência não linear. A componente capacitiva representa a corrente que percorre a capacitância formada pelos grãos de ZnO separados pela região intergranular. A componente I_c é predominante na tensão de operação do para-raios e apresenta comportamento praticamente senoidal quando o para-raios está submetido à tensão de operação do sistema. Já a componente resistiva é responsável pelas perdas no para-raios. Sua característica é apresentar distorção harmônica em virtude da região intergranular do varistor.

3.1.1 - Propriedades elétricas dos varistores de óxido metálico

A propriedade mais importante dos varistores de óxido metálico é a sua característica não linear *corrente x tensão*. Desenvolvidos inicialmente para aplicação em circuitos eletrônicos, suas características não lineares e a baixa corrente de fuga na tensão de operação em regime permanente, adicionadas à alta capacidade de absorção térmica, fizeram o varistor de óxido metálico atrativo para as aplicações elétricas de potência. Essa associação de fatores representou um avanço em relação aos para-raios convencionais a carboneto de silício, possibilitando um novo tipo de equipamento com melhores níveis de proteção. Isto é possível devido a conexão direta dos varistores que compõem o para-raios ao sistema elétrico gerando apenas uma corrente de fuga desprezível em condições de operação normal.

Na Fig. 3.3 estão destacados os principais aspectos referentes a um varistor de óxido metálico. Podem-se ver três regiões distintas: a região de baixa corrente (região I), a região de alta não linearidade (região II) e a região de alta corrente (região III).

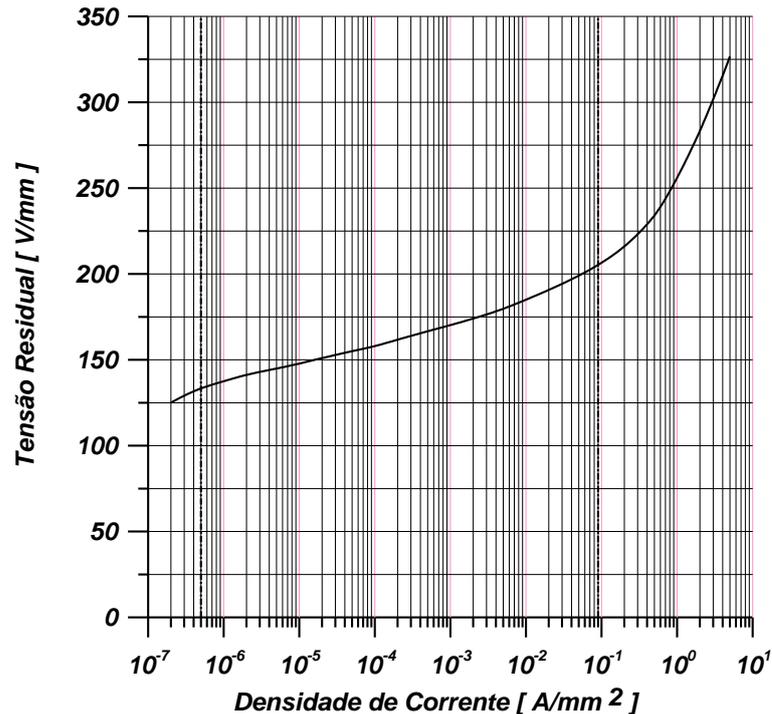


Fig. 3.3 - Curva característica típica de um varistor [13].

A região I (região linear de baixa corrente) é caracterizada por um comportamento aproximadamente linear, dependente da temperatura e torna-se bastante íngreme nas proximidades da região de descarga. As propriedades elétricas principais são determinadas pelas características dos contornos de grão de ZnO. Nesta região o para-raios opera em regime permanente.

Na região II (alta não linearidade) o para-raios conduz uma grande corrente, mesmo para pequenas variações de tensão. O grau de não linearidade é determinado no patamar da região não linear. Quanto menos inclinada for a curva, melhor será o dispositivo ou equipamento.

O limite entre a região de alta não linearidade e a região de alta corrente é denominado de nível de proteção contra surtos atmosféricos. Este ponto da curva representa a queda de tensão no para-raios quando a corrente de descarga nominal percorre entre seus terminais.

A região III (região de alta corrente) está diretamente relacionada ao nível de proteção oferecido pelo para-raios. Trata-se de uma região de condução aproximadamente linear. Nesta região, o para-raios pode entrar em processo de avalanche térmica e não se pode assegurar a manutenção de suas características.

O mecanismo de condução no óxido metálico pode ser explicado em termos de sua microestrutura [10]. Conforme visto anteriormente (Fig. 3.1(b)), o material é composto de duas regiões distintas – os grãos de ZnO e a região intergranular, composta de outros óxidos

metálicos. A região entre grãos é de fundamental importância na primeira parte da curva, sendo que a intensidade da corrente de fuga depende essencialmente dos materiais constituintes desta camada. O processo de condução na primeira parte da curva característica é explicado pelos mecanismos de barreiras de potencial na região entre os grãos, característicos de dispositivos semicondutores.

Na região entre os grãos a temperatura exerce forte influência na condutividade, ao passo que temperaturas mais elevadas aumentam a energia dos elétrons facilitando sua passagem através das barreiras de potencial. Tal dependência com a temperatura explica o crescimento da corrente de fuga quando os varistores são submetidos a algum tipo de aquecimento.

A segunda parte da curva é explicada pela condução através dos grãos de ZnO. Neste ponto a energia absorvida pelos elétrons da camada intergranular se torna tão alta que os impactos causados pelo seu movimento criam lacunas na barreira de potencial nos contornos dos grãos. A corrente de lacunas diminui a largura da barreira de potencial, permitindo o aumento da corrente. A continuidade deste processo leva a redução das barreiras de potencial e, conseqüentemente, destruição dos varistores, chegando-se então à terceira parte da curva característica.

Na terceira parte da curva observa-se uma elevação drástica da tensão e retomada da linearidade. Nesta região, inicia-se a predominância da resistência dos grãos de ZnO sobre a camada intergranular.

3.1.2 - Comportamento térmico

Durante a operação normal do sistema ao qual se encontram conectados, os para-raios de óxido metálico sofrem um processo de aquecimento devido a potência consumida sob frequência industrial, bem como devido a presença de radiação solar. Uma vez que os varistores de óxido metálico apresentam característica semi-condutora, qualquer elevação na temperatura de operação dos para-raios resulta em uma elevação na corrente de fuga, e na potência consumida, fato que, a princípio, resulta em um fenômeno cíclico, com tendência a instabilidade [13].

Na ocorrência de sobretensões ou surtos, a corrente de fuga que percorre os elementos de óxido metálico sofre um aumento significativo, o que implica no aumento de energia absorvida pelo para-raios e, conseqüentemente, aumento de temperatura. O seu comportamento térmico pode ser analisado através das curvas de estabilidade térmica mostradas na Fig. 3.4 [14].

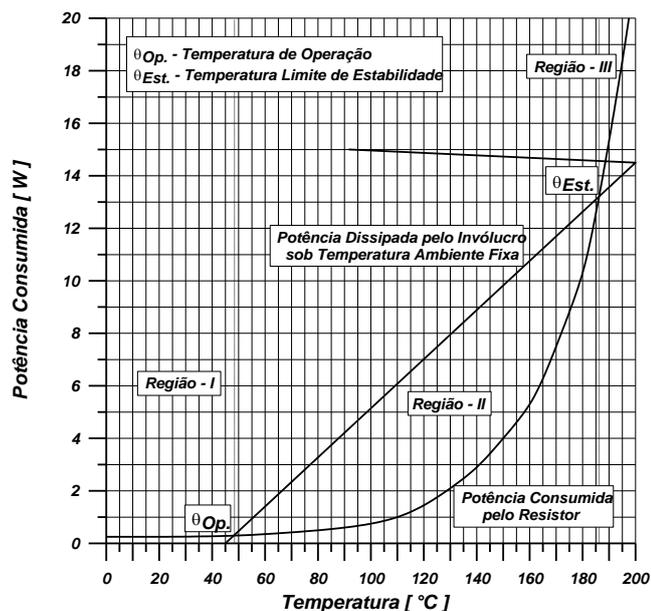


Fig. 3.4 - Características Dissipada e Consumida versus Temperatura para um varistor de óxido metálico [13].

Um varistor é considerado estável termicamente quando, após a ocorrência de um surto, ele retorna as suas condições normais e mantém sua capacidade de dissipação de calor durante o regime de operação contínua sem apresentar aquecimento excessivo.

Na Fig. 3.4 verifica-se que quando a capacidade de dissipação de calor do para-raios é maior que a capacidade de geração de calor, ele apresenta uma tendência intrínseca de retornar ao ponto de equilíbrio estável. Entretanto, se a capacidade de dissipação de calor do para-raios for inferior a capacidade de geração de calor, ele apresenta uma tendência intrínseca a aumentar rapidamente sua temperatura de operação, fato que caracteriza um fenômeno denominado avalanche térmica.

Os para-raios podem, teoricamente, tolerar variações de temperatura até o seu limite de estabilidade térmica. Estas variações são resultantes das descargas de surtos atmosféricos, de manobra ou mesmo de sobretensões em frequência industrial. Esta característica torna-se possível quando o limite de estabilidade térmica não é ultrapassado, resultando sempre no retorno da temperatura para o valor de operação estável. Teoricamente, a margem de temperatura entre o Ponto de Operação e o Ponto Limite de estabilidade Térmica define a Máxima Capacidade Teórica de Absorção de Energia de um para-raios a óxido metálico sem centelhadores [13].

A aplicação de impulsos de corrente de curta duração e elevada amplitude ou longa duração e baixa amplitude, são fatores que aceleram o processo de degradação dos varistores produzindo pontos de condutividade seguidos de rupturas no colar isolante ou perfurações. Isto resulta na redução do ponto limite de estabilidade do varistor, reduzindo a capacidade de

absorção de energia e o desempenho do dispositivo, deixando-o mais propenso a apresentar falhas.

3.1.3 - Capacidade de absorção de energia

A capacidade de absorção de energia pode ser entendida a partir das propriedades intrínsecas dos varistores e das propriedades térmicas dos para-raios.

A capacidade de absorção de energia intrínseca é relacionada a energia para um único impulso, e está associada a uma solicitação de energia instantaneamente injetada durante um único impulso de energia de poucos micro ou milissegundos que não pode exceder a um valor de energia para o qual os varistores sofrem uma severa solicitação termomecânica. Desta forma, solicitações com elevadas densidades de corrente e de energia podem acarretar uma variação súbita de temperatura em partes desses elementos, associados com severos esforços de tração e de compressão. Estas solicitações podem provocar trincas, perfuração ou descarga na isolação dos varistores.

A capacidade de absorção de energia térmica está associada com a capacidade de um determinado projeto de para-raios de absorver uma quantidade máxima de energia, para dada forma de onda e amplitude de corrente, e ser capaz de dissipar esta energia para o meio externo em forma de calor, mantendo a sua estabilidade térmica sem que ocorram alterações significativas em suas propriedades térmicas e elétricas.

A capacidade de absorção de energia é geralmente declarada pelos fabricantes em termos de kJ/kV e está associada a um impulso de corrente com forma de onda e amplitude definidas.

3.1.4 - Processo de falha

Estima-se que a vida útil de um para-raios de distribuição seja 15 anos. Para isso, considera-se que os projetos elétrico e mecânico sejam bem elaborados e que os para-raios sejam adequadamente selecionados e instalados na rede de distribuição primária.

Em Franco [8], constata-se que na prática os para-raios de distribuição não estão apresentando o desempenho esperado. Uma vez que normalmente esses dispositivos estão operando de forma inadequada ou até mesmo falhando com menos de cinco anos de operação, resultando de forma inesperada a descontinuidade do fornecimento de energia elétrica dos sistemas de distribuição e comprometendo a confiabilidade do para-raios.

Essa informação é baseada em estudos realizados por empresas concessionárias de energia e laboratórios de pesquisa que identificaram as principais causas que afetam o

desempenho do para-raios. Foi observado que a principal causa de falhas dos para-raios, representando 85,6%, é a penetração de umidade por perda da estanqueidade do invólucro. Além disso, foi associado 5,9% das falhas às descargas atmosféricas, 4,5 % à contaminação do invólucro, 2,5 % à aplicação inadequada e 1,5 % à causas desconhecidas. No entanto, foram considerados projetos de para-raios de Carboneto de Silício (SiC), para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) com centelhadores e para-raios de Óxido de Zinco sem centelhadores.

A penetração de umidade na parte ativa dos para-raios de distribuição é um problema típico dos projetos que utilizam invólucro de porcelana. Pesquisas apontam as falhas de projeto como responsáveis por 53 % das falhas dos para-raios por penetração de umidade [3].

Quando se considera apenas o projeto do para-raios de ZnO sem centelhador com invólucro polimérico, possivelmente as falhas associadas à penetração de umidade serão atenuadas. Uma vez que esse tipo de projeto não apresenta espaçamento interno de ar resultando em um dispositivo menos propenso a penetração de umidade. No entanto, isso não anula as demais causas de falhas.

No que se refere às descargas atmosféricas, foi observado que muitos dos para-raios analisados apresentavam umidade em seus elementos ativos, indicando que a principal causa das falhas foi a umidade. Já em relação à contaminação, os varistores de ZnO são submetidos a um processo de envelhecimento acelerado. Isso reduz a vida útil desses elementos, visto que a contaminação provoca uma distribuição de tensão não uniforme no invólucro dos para-raios.

A correta aplicação dos para-raios consiste na instalação de projetos compatíveis com as características do sistema primário de distribuição. Isto é, os para-raios devem ser dimensionados de acordo com as condições de serviço do sistema. Dessa forma, além de reduzir o número de falhas, é possível obter uma proteção adequada aos equipamentos melhorando a relação entre custo e benefício.

As falhas provenientes de causas desconhecidas possivelmente estão relacionadas com a operação inadequada do desligador automático, provocando a retirada do para-raios do sistema de distribuição primário precocemente devido a falha de um dispositivo auxiliar.

3.1.5 - Dimensionamento do para-raios

Os para-raios são dimensionados de acordo com o sistema em que irão operar. Isso envolve a determinação de requisitos mínimos nos quais relacionam características elétricas e térmicas. Para isto, além da capacidade de absorção de energia, alguns parâmetros também devem ser avaliados:

3.1.5.1 - Tensão nominal (U_R)

A tensão nominal de um para-raios é o valor de tensão de frequência industrial para o qual o para-raios é projetado. Geralmente a tensão nominal é o limite para as sobretensões dinâmicas permissíveis no sistema, sendo permitido ultrapassar este valor somente nas condições estabelecidas explicitamente pelo fabricante do para-raios considerado.

Em para-raios de óxido metálico sem centelhadores a tensão nominal consiste no valor de tensão (eficaz à frequência industrial) que é aplicada aos terminais do para-raios durante 10 segundos sob condições de sobretensão transitória. O para-raios deve operar corretamente e manter a estabilidade térmica após a absorção de uma energia prévia. Esta energia é estabelecida no ensaio de ciclo de operação [8].

3.1.5.2 - Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV)

É definida como o maior valor eficaz de tensão na frequência industrial aplicada de forma permanente sob os terminais do para-raios de óxido metálico sem centelhadores onde ele opera de forma contínua sem que haja alteração em suas propriedades térmicas e elétricas.

3.1.5.3 - Corrente de referência

Consiste no maior valor da componente resistiva da corrente na frequência industrial utilizada para determinar a tensão de referência dos para-raios. Normalmente é utilizado por parte dos fabricantes uma corrente de referência de 1 mA.

3.1.5.4 - Tensão de referência

Trata-se do maior valor da tensão de frequência fundamental dividida por $\sqrt{2}$ que é aplicada aos terminais do para-raios quando por este flui a corrente de referência. Ela define o ponto de transição entre as regiões de baixas correntes e de elevada não linearidade, sendo utilizada como parâmetro para a especificação das características de operação desses para-raios.

3.1.5.5 - Corrente de descarga

Consiste na corrente de impulso que flui através do para-raios, sendo caracterizada pela sua forma, amplitude e polaridade.

3.1.5.6 - Corrente de descarga nominal (I_n)

A corrente de descarga nominal corresponde ao valor máximo da corrente de descarga com forma 8/20 μ s utilizado para classificar o para-raios. Usualmente os para-raios são

classificados como classe estação (para-raios de 10 kA e 20 kA) e classe distribuição (para-raios de 5 kA e 10 kA classe de descarga de linha de transmissão 1).

De acordo com a sua classificação, os para-raios devem ser capazes de suportar impulsos de alta corrente e de curta duração com forma de onda 4/10 μ s. As normas [15, 16, 17] relacionam o grau de suportabilidade do para-raios de acordo com as condições de serviço a ele impostas. Na Tabela 3.1 estão apresentados os níveis de corrente específicos aos para-raios classe distribuição estabelecidos pelas normas de acordo com as condições de serviço.

Tabela 3.1- Suportabilidade dos para-raios de acordo com as condições de serviço.

Condições de serviço	ANSI	IEC	ABNT
Leve	40 kA	-	-
Normal	65 kA	65 kA	65 kA
Pesado	100 kA	100 kA	100 kA

3.1.5.7 - Tensão residual

Define-se como o valor máximo da tensão que aparece nos terminais do para-raios durante a passagem da corrente de descarga. Sua amplitude é função da forma do impulso e da taxa de crescimento da corrente, bem como da amplitude da corrente de descarga. Ela é importante na determinação dos níveis de coordenação de isolamento, pois os equipamentos a serem protegidos devem apresentar um nível básico de isolamento superior ao valor da tensão residual.

3.2 - O desligador automático convencional

Em 10 de maio de 1922 Lawrence A. Golladay entrou com pedido de patente para um dispositivo denominado de indicador de para-raios. Tal dispositivo não foi chamado de desligador porque o seu objetivo era apenas indicar que o para-raios falhou, visto que determinar visualmente se um para-raios instalado no sistema falhou ou não era uma tarefa difícil. Esse dispositivo foi o precursor do desligador automático [18].

O desligador automático tem a função de desconectar o para-raios do sistema quando ele é submetido a solicitações acima da sua capacidade, ou quando apresenta níveis de degradação que resultam em correntes elevadas de caráter permanente. Além disso, ele também tem a função de sinalizar a operação severa do para-raios indicando a necessidade de sua substituição.

O desligador automático é conectado ao para-raios através do terminal de terra. A Fig. 3.5 apresenta o esboço de um para-raios de distribuição conectado a um desligador automático.

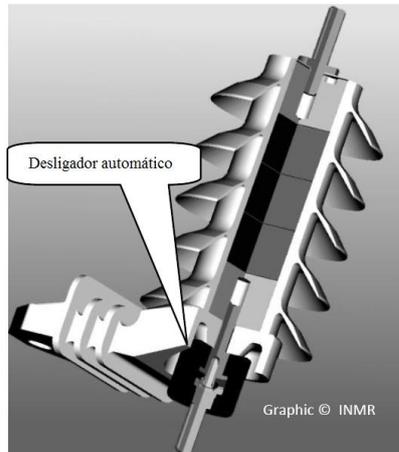


Fig. 3.5 - Desenho de um para-raios de distribuição acoplado em série com um desligador automático. Adaptado de [19]

Trata-se de um dispositivo que deve apresentar em seu projeto elementos que permitam a separação do condutor terra do para-raios quando uma falha ocorre. Para isso, tradicionalmente é utilizada uma pequena cápsula ou cartucho contendo carga explosiva, confinado em uma câmara de baquelite de alta resistência mecânica, conforme mostra a Fig. 3.6.

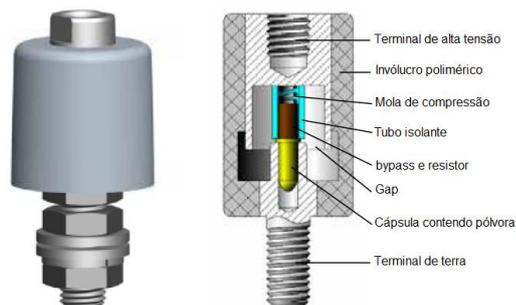


Fig. 3.6 - Desenho do desligador automático convencional. Adaptado de [20].

Nos desligadores convencionais, isto é, os que contém carga explosiva, a separação do condutor terra ocorre quando a carga explosiva é deflagrada por meio da ignição de um centelhador ou através da dissipação de calor gerada por um resistor elétrico ou conectando o cartucho explosivo diretamente ao condutor terra. Assim, quando o para-raios falhar, um arco elétrico é criado entre a cápsula contendo pólvora e o terminal inferior do desligador. O calor gerado pelo arco elétrico provoca a explosão da cápsula fragmentando o invólucro do desligador e separando o para-raios do terminal de terra, conforme ilustrado na Fig. 3.7.

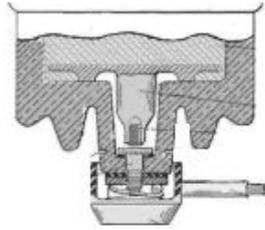


Fig. 3.7 (a) - Desligador automático convencional antes de atuar. Adaptado de [18].

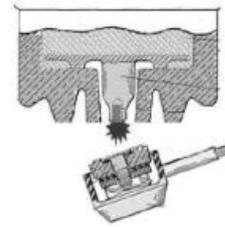


Fig. 3.7(b) - Desligador automático convencional durante atuação. Adaptado de [18].

O esquema típico de um desligador automático convencional pode ser visto na Fig. 3.8. Existem vários projetos de desligadores automáticos, desde os desligadores utilizados em para-raios de carboneto de silício (SiC) até os mais atuais utilizados em para-raios de óxido metálico.

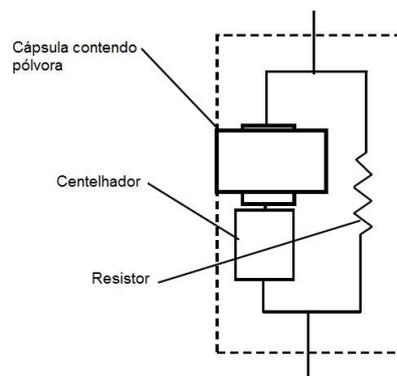


Fig. 3.8 - Esquema típico de um desligador automático.

3.2.1 - Projetos usuais dos desligadores automáticos convencionais

Conforme já mencionado, os desligadores automáticos convencionais são aqueles cuja atuação é realizada através da deflagração de uma cápsula explosiva. Em seguida, serão apresentados alguns projetos de desligadores automáticos convencionais:

- Centelhador série;
- Centelhador em paralelo com resistor;
- Centelhador em paralelo com bobina de bloqueio;
- Carga explosiva em curto-circuito.

3.2.1.1 - Desligador com centelhador série

O princípio de funcionamento deste projeto de desligador consiste na transferência de calor de forma irradiada. Quando o para-raios é submetido a impulsos de corrente o centelhador do desligador irá operar, porém a energia de arco da ignição do centelhador não

deverá ser suficiente para a deflagração da carga explosiva. O desligador com centelhador série está representado na Fig. 3.9.

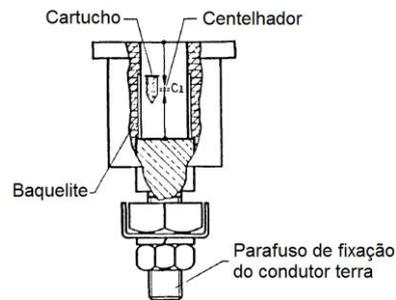


Fig. 3.9 - Esquema do desligador com centelhador série. Adaptado de [21].

De acordo com a IEC [15], o desligador deve suportar no mínimo dois impulsos de corrente elevada na forma $4/10 \mu s$ sem atuar. A suportabilidade do desligador deve estar em concordância com a corrente nominal e as condições de serviço (leve, normal ou pesado) do para-raios.

No caso de falha do para-raios, irá circular pelo desligador a corrente de curto-circuito do sistema, provocando um calor muito intenso oriundo do arco elétrico. O calor irradiado irá, em função do tempo de circulação da corrente, provocar a deflagração da carga explosiva gerando a fragmentação da câmara de baquelite e resultando na separação do condutor terra do para-raios.

Neste tipo de projeto é importante levar em consideração a distância entre o centelhador e o cartucho, visto que a ignição é gerada através do calor irradiado.

3.2.1.2 - Desligador com centelhador em paralelo com resistor

O desligador com centelhador em paralelo com resistor está representado na Fig. 3.10. Este tipo de projeto funciona como uma chave de “by-pass” operando apenas na ocorrência de transitórios rápidos. Em virtude disso, a energia dissipada pelo arco elétrico do centelhador não é suficiente para deflagrar a carga explosiva. Contudo, a partir do momento em que ocorre a falha do para-raios, a corrente de curto-circuito irá aquecer o resistor do desligador automático gerando calor suficiente para iniciar a deflagração da carga explosiva.

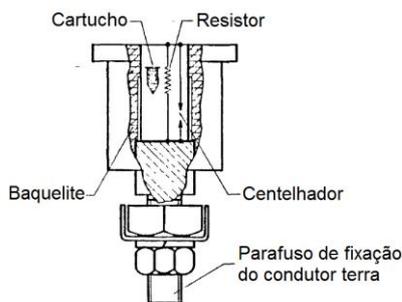


Fig. 3.10 - Esquema do desligador com centelhador em paralelo com resistor. Adaptado de [21].

3.2.1.3 - Desligador com centelhador em paralelo com bobina de bloqueio

Neste tipo de projeto, representado na Fig. 3.11, em condições normais de operação a corrente de fuga percorre pela bobina em série com o resistor. O calor gerado no resistor é insuficiente para deflagrar a carga explosiva. Quando o para-raios é submetido a um impulso de corrente, a alta taxa de crescimento da corrente provoca uma queda de tensão na bobina de bloqueio resultando na atuação do centelhador do desligador. Após a passagem do impulso de corrente, o arco elétrico no centelhador se extingue e a corrente de fuga percorre novamente através da bobina de bloqueio e do resistor.

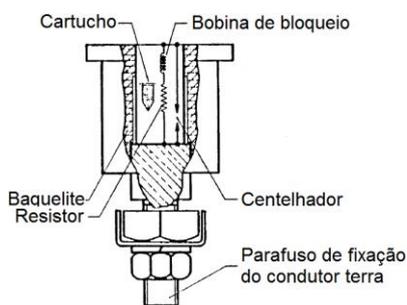


Fig. 3.11 - Esquema do desligador com centelhador em paralelo com bobina de bloqueio. Adaptado de [21].

No caso de falha do para-raios, a corrente de curto-circuito irá percorrer pelo resistor provocando uma dissipação de calor elevada que em contato com o cartucho de carga explosiva deflagrará a explosão do desligador, separando rapidamente o condutor de terra do para-raios.

3.2.1.4 - Desligador com carga explosiva em curto-circuito

O projeto do desligador com carga explosiva em curto-circuito apresenta comportamento semelhante ao modelo do desligador com centelhador série. Durante a falha do para-raios a corrente de curto-circuito através do desligador provoca aquecimento necessário na cápsula que contém a carga explosiva, ocasionando a sua deflagração. O desligador está representado na Fig. 3.12.

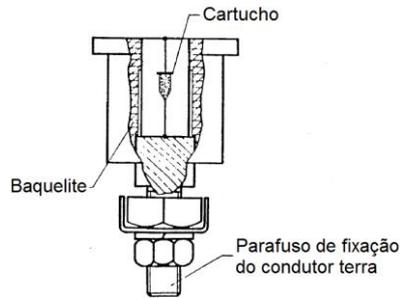


Fig. 3.12 - Esquema do desligador com carga explosiva em curto-circuito. Adaptado de [21].

3.3 - Comentários

No final da década de 70 os para-raios de média tensão fabricados a base de carboneto de silício começaram a ser substituídos pelos para-raios de óxido metálico, também denominados de para-raios de óxido de zinco. A utilização do novo varistor permitiu eliminar os centelhadores desses equipamentos resultando em uma estrutura relativamente mais simples.

Associado ao para-raios está o desligador automático. Este “acessório” é de extrema importância para uma correta operação do para-raios. Suas funções são permitir a desconexão do para-raios durante uma falha e sinalizar tal ocorrência.

No decorrer dos anos alguns projetos de desligadores automáticos foram desenvolvidos. No entanto, todos eles são compostos por uma cápsula contendo pólvora gerando uma série de problemas operacionais, objeto de estudo do próximo capítulo.

CAPÍTULO 04

DELIMITAÇÃO DO TEMA

Neste capítulo são apontados os principais problemas associados à operação dos para-raios em conjunto com o desligadores automáticos, considerando o dimensionamento dos para-raios e o desempenho dos desligadores associados.

4.1 - Sobredimensionamento dos para-raios

No Brasil é prática comum utilizar nas redes de distribuição para-raios de corrente de descarga nominal de 10 kA. Entretanto, se forem analisadas as características das descargas atmosféricas no país, é possível afirmar, com base em estudos de campo, que para-raios de 5 kA seriam adequados para a grande maioria das redes de distribuição, desempenhando adequadamente o seu papel de dispositivo de proteção e apresentando uma baixo risco de falha. Entretanto, a utilização de para-raios de 5 kA nas redes de distribuição no Brasil representariam uma quebra de paradigma, sendo necessário mostrar os riscos e os ganhos envolvidos nesta possibilidade, os quais estão relacionados ao risco de falha e ao custo do equipamento.

Em Diniz [22], foi apresentado o desenvolvimento e métodos de avaliação de um projeto de para-raios de 5 kA. O dispositivo foi avaliado a partir de uma sequência adaptada de ensaios envolvendo ensaios de tipo definidos por normas internacionais. Além da sequência de ensaios, também foi realizado um estudo sobre a estimativa do risco de falha do projeto. Foi observado que o risco de falha envolvendo o para-raios de 5 kA foi relativamente

superior ao risco de falha relacionado ao para-raios de 10 kA. No entanto, notou-se que o aumento do risco é compensado pelo custo associado ao investimento na compra dos para-raios, assim como no elevado número de para-raios de 10 kA que são retirados do sistema devido a operação do desligador automático, mas ainda em boas condições operacionais. Em virtude disso, a pesquisa realizada mostrou que é viável instalar para-raios de 5 kA no sistema de distribuição do Brasil, demonstrando que os para-raios de 10 kA são sobredimensionados e representam custos desnecessários para as concessionárias de energia.

4.2 - A atuação do desligador convencional

O desligador automático tem a função de desconectar o para-raios do sistema quando o mesmo é submetido a solicitações acima da sua capacidade, ou quando apresenta níveis de degradação que resultam em correntes elevadas de caráter permanente. Sua função é sinalizar a operação severa do para-raios, desconectando-o do sistema, indicando a necessidade de sua substituição.

Embora o desligador automático seja projetado para operar em tais situações, estudos mostram que falhas relativas a atuação desse dispositivo são comumente observadas [23, 24, 25, 26, 27, 28]. Isto é, a operação do desligador ocorre em situações adversas das supracitadas ou nem ocorre, provocando uma série de problemas no sistema de distribuição de energia elétrica. Em virtude disso, o presente capítulo discorre sobre as principais causas das falhas atribuídas aos desligadores automáticos convencionais.

Trabalhos realizados na década de 80 já indicavam problemas relacionados à operação dos desligadores automáticos convencionais. Em Franco [23], foram analisados os desempenhos de seis tipos de desligadores convencionais de quatro fabricantes distintos. Os desligadores foram submetidos a ensaios de corrente elevada, corrente de longa duração e ciclo de operação. Esses ensaios são classificados pelas normas IEC [15], ANSI [16] e ABNT [17] como ensaios de tipo. Portanto, são ensaios obrigatórios para o processo de desenvolvimento dos desligadores.

Nesse estudo não foi possível executar todos os ensaios em amostras de todos os projetos de desligadores. No entanto, os resultados obtidos, embora incompletos, forneceram um indicativo dos problemas existentes:

- Ensaio de corrente elevada: 47% das amostras ensaiadas operaram indevidamente;
- Ensaio de ciclo de operação: 75% das amostras operaram indevidamente.

Os resultados indicam que grande parte dos para-raios instalados com estes desligadores automáticos poderão ser desconectados do sistema de distribuição, mesmo operando em boas condições, por operação indevida do desligador automático.

Pesquisas mais recentes continuam apresentando resultados semelhantes aos encontrados na década de 80. Um estudo realizado em áreas de concessão da AES Sul – Distribuidora Gaúcha de Energia S/A mostrou o número de para-raios por ano que eram retirados de operação devido a falhas nos desligadores automáticos [25]. Foram analisadas unidades instaladas na zona rural e unidades instaladas na zona urbana. Notou-se que o padrão de falha existente no mercado para os desligadores automáticos convencionais é de 70%.

A Tabela 4.1 apresenta a taxa de falha dos desligadores automáticos considerando três níveis de corrente: 40 kA, 65 kA e 100 kA.

Tabela 4.1 - Número de falhas por ano em desligadores convencionais

Falha do desligador	40 kA	65 kA	100 kA
Redes Urbanas	25	175	175
Redes Rurais	37	259	259
Total (falhas/ano)	62	434	434

Em Wanderley Neto [26] foram realizadas medições da corrente de fuga em nove para-raios de distribuição de 12 kV retirados de campo devido a atuação do desligador. Os resultados do estudo mostraram que apenas dois estavam defeituosos, indicando a atuação precoce dos desligadores. Neste caso, as demais unidades ainda se encontravam em boas condições operacionais, ou seja, sem apresentar índices consideráveis de degradação.

Ensaio realizados no laboratório [27, 28] mostraram que desligadores automáticos convencionais utilizados em para-raios de 10 kA tem suportado apenas 52% do valor mínimo estabelecido nas normas vigentes [15, 16, 17].

As normas relacionam o grau de suportabilidade do para-raios de acordo com as condições de serviço a ele impostas. Um desligador desenvolvido para operar com um para-raios de 10 kA deve ser capaz de suportar no mínimo dois impulsos de 100 kA na forma 4/10 μ s sem falhar. No entanto, ensaios de “*Up-and-Down*” realizados no Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luís Barreira Martinez em um determinado tipo de desligador convencional mostraram que os desligadores poderiam atuar a partir de 52,1 kA.

Sendo assim, com base nas pesquisas mencionadas, nota-se que a falha na operação do desligador automático está relacionada com a instabilidade na atuação do dispositivo. Isto é,

ocorrência de operações indevidas ou não atuações durante a operação severa do para-raios. Neste último caso, uma falta fase terra é mantida na linha podendo resultar na explosão do para-raios.

A atuação imprópria geralmente está relacionada à ignição imprevisível da pólvora, pois é suscetível a fatores como umidade e temperatura. Contudo, também pode estar relacionado a um problema de dimensionamento.

Os problemas relativos a não atuação do desligador, considerando a estrutura do dispositivo convencional, estão associados a três possíveis causas:

- Existência de impedâncias defeituosas;
- Influência das condições ambientais na pólvora;
- Interrupção do gap por ingresso de materiais isolantes durante o processo de fabricação do desligador.

A primeira causa é a existência de impedâncias defeituosas (resistor ou capacitor), evitando a passagem da corrente de fuga e, conseqüentemente, a criação de uma sobretensão para promover a faísca necessária. Esse problema pode ser proveniente de uma montagem descuidada ou ainda da utilização de elementos de má qualidade. Neste caso, a impedância pode tornar-se um circuito aberto ou um curto-circuito. Em ambas as situações não haverá sobretensão para promover a ignição da pólvora. Isso indica que o desligador não irá atuar.

Um ensaio realizado no laboratório, em um conjunto de desligadores convencionais novos, teve como objetivo monitorar o comportamento da impedância interna do desligador durante a aplicação de uma sequência de impulsos de corrente envolvendo surtos de naturezas atmosférica e de manobra.

As amostras foram submetidas a impulsos de 5 kA e 10 kA na forma de 8/20 μ s, 40 kA na forma de 4/10 μ s e 150 A e 250 A na forma de 2ms. Na Tabela 4.3 estão apresentados os resultados das medições realizadas em cinco unidades. Tais resultados indicam como são aleatórios os valores das impedâncias internas após a aplicação dos impulsos.

Tabela 4.2 - Medições de impedâncias internas de desligadores convencionais.

Amostra	Resistência (k Ω)					
	Nova	Após 5 kA	Após 10 kA	Após 40 kA	Após 150 A	Após 250 A
1	3,6	3,6	3,6	1,4	1,8	2,0
2	4,3	4,3	4,2	1,8	2,4	2,3
3	1.100	(*)	(*)	0,8	1,3	1,2
4	4,6	3,6	3,6	0,2	0,8	3,3
5	3,6	3,6	3,6	1,4	1,8	2,0

(*) Não foi possível realizar a medição.

As amostras foram submetidas a um processo de envelhecimento acelerado e a impedância foi medida nas amostras novas e após a aplicação de cada impulso de corrente. Através deste ensaio, foi possível observar que a impedância interna dos desligadores apresentaram três características distintas:

- 1) A maioria dos desligadores apresentou impedâncias na ordem de alguns quiloohms, mantendo a característica inicial inalterada;
- 2) Algumas unidades apresentaram apenas alguns Ohms, indicando característica de curto-circuito;
- 3) Uma unidade apresentou grandeza na ordem de megaohms, ou não foi possível realizar a medição, indicando a característica de um circuito aberto.

A segunda causa está associada à utilização de pólvora, que, naturalmente, apresenta uma ignição aleatória e é suscetível às condições ambientais, principalmente umidade. Neste caso, é possível que a cápsula contendo pólvora não exploda ou que exploda para valores aleatórios de corrente. Isso pode resultar em um valor mínimo de corrente de atuação do desligador fora do valor estabelecido nas normas vigentes [15, 16, 17], conforme observado em pesquisas realizadas [23, 24, 25, 26, 27, 28].

A melhor maneira de determinar o valor mínimo da corrente de ruptura do desligador é por meio de um ensaio denominado “*Up-and-Down*”. Esta técnica permite determinar estatisticamente os limites operacionais do conjunto de amostras ensaiadas [29, 30, 31].

Através do ensaio de “*Up-and-Down*” é possível determinar o valor médio da corrente de ruptura e também seu desvio padrão. Dessa forma, estima-se os limites de operação do

desligador automático para altas correntes.

Para que o desligador opere em conformidade com as normas vigentes [15, 16, 17], é preciso que o limite inferior da corrente de ruptura, obtido através do ensaio de “*Up-and-Down*”, seja igual ou maior que os limites estabelecidos na Tabela 4.2.

O ensaio com base no método “*Up-and-Down*” realizado nos desligadores consiste basicamente na aplicação de sucessivos impulsos de corrente na forma 4/10 μ s, substituindo-se as amostras a cada aplicação. Aumenta-se o nível do próximo impulso de corrente I_i quando da primeira ocorrência de uma aplicação que não resulte em ruptura no impulso anterior, ou reduz-se o nível do próximo impulso de corrente I_i se a aplicação do impulso anterior resultou em ruptura. Esse procedimento é seguido até que todas as amostras sejam ensaiadas.

O valor de corrente com 50% de probabilidade de ruptura ($I_{d50\%}$) e seu respectivo desvio padrão σ podem ser obtidos a partir das Equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$I_{d50\%} = \frac{\sum n_v \cdot I_v}{\sum n_v} \pm \frac{\Delta I}{2}, \quad (4.1)$$

$$\sigma = \frac{1,62}{\Delta I} \left[\frac{\sum n_v \cdot I_v^2 - \left(\frac{(\sum n_v \cdot I_v)^2}{\sum n_t} \right)}{\sum n_t} \right] + 0,047 \cdot \Delta I, \quad (4.2)$$

onde:

$n_v \cdot I_v$ – corresponde ao número de aplicações n à corrente I_i .

ΔI – degrau de corrente utilizado durante o ensaio.

A Tabela 4.4 exibe o resultado de um ensaio de “*Up-and-Down*” realizado em um conjunto composto por 30 unidades de desligadores convencionais, desenvolvidos para serem instalados com para-raios de 10 kA. Nota-se que o valor médio da corrente de ruptura ($I_{50\%}$) do desligador foi igual a 65,7 kA. Considerando um limite de confiança igual a 99,99%, os limites inferior e superior foram 52,1 kA e 79,3 kA, respectivamente.

As normas IEC, IEEE e ANSI [15, 16, 17] estabelecem que um para-raios de 10 kA deve ser projetado para operar em condições de serviço pesado, ou seja, deve ser capaz de suportar no mínimo dois impulsos de 100 kA na forma 4/10 μ s. À vista disso, constata-se que as amostras analisadas estavam subdimensionadas, ao passo que o valor do limite inferior da corrente de ruptura está aquém do previsto nas normas supracitadas. Isto indica que os desligadores apresentaram um comportamento mais adequado a condição de serviço leve, que

deve suportar, no mínimo, 40 kA. Esse problema pode ser atribuído à dispersão natural associada ao método de acionamento (utilização de pólvora) do desligador convencional.

Tabela 4.3 - Resultado do ensaio de “Up and Down” realizado em desligadores convencionais.

Corrente mínima [I_{\min}]	Corrente média [$I_{50\%}$]	Corrente máxima [I_{\max}]
52,1 kA	65,7 kA	79,3 kA

Por fim, a terceira causa de falha do desligador convencional está associada a uma possível interrupção do gap devido ao ingresso de materiais isolantes durante o processo de fabricação. Neste caso, não existe qualquer possibilidade para a geração de faísca, logo, o desligador não irá atuar. Em alguns dos ensaios realizados os desligadores explodiram, devido a uma falha na resistência interna, enquanto que a cápsula contendo pólvora foi mantida intacta. Isso provavelmente ocorreu devido ao bloqueio do gap durante o processo de fabricação do desligador ou devido à utilização de resistores mal projetados.

Além da falta de confiabilidade do seu funcionamento, o desligador convencional pode apresentar outros problemas intrínsecos graves. O primeiro diz respeito à sua atuação que acontece devido a uma explosão, de modo que resulta em uma quebra violenta do invólucro.

Ensaio realizados no laboratório mostram que os fragmentos são lançados em alta velocidade. Considerando que eles são compostos de plásticos rígidos e parafusos metálicos, esta explosão é potencialmente prejudicial para os transeuntes e para os equipamentos próximos ao local onde o para-raios está instalado. As Fig.s 4.1 e 4.2 apresentam fotografias de desligadores convencionais, desenvolvidos por fabricantes distintos, antes e após a atuação.



Fig. 4.1 - Fotografia de um desligador automático convencional antes e após a atuação.



Fig. 4.2 - Fotografia de um desligador automático convencional antes e após a atuação.

O segundo problema está associado à geração de ruído de alta frequência, ou *Radio Interference Voltage* (RIV), devido à existência de um gap interno. Normas determinam os níveis máximos de RIV permitidos para os diferentes equipamentos. No caso de para-raios, este valor é de 2.500 μV [15].

Durante o ensaio realizado para monitorar o comportamento da resistência interna dos desligadores após a aplicação de impulsos de corrente, além da medição da resistência interna também foram medidos os níveis de RIV. O ensaio foi conduzido em laboratório com as mesmas amostras da Tabela 4.3. As medições obtidas no ensaio estão apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 - Medições da Tensão de Radio Interferência em desligadores convencionais

Amostra	RIV (μV)				
	Nova	Após 5 kA	Após 40 kA	Após 150 A	Após 250 A
1	655	2.763	4.461	4.461	4.461
2	510	2.763	2.763	4.461	6.359
3	405	4.461	1.282	2.763	10.493
4	405	4.461	2.763	4.461	1.282
5	405	4.461	10.493	4.461	2.032

O terceiro problema não considera apenas o desligador, mas a forma como os para-raios são normalmente instalados no sistema elétrico. Os para-raios de rede de distribuição são geralmente montados em conjunto com o transformador de distribuição que deve

proteger. Neste caso existem dois esquemas possíveis de ligação envolvendo o transformador, o para-raios e o elo fusível.

Na primeira configuração, ilustrada na Fig. 4.3(a), o elo fusível está em série com a ligação em paralelo entre o transformador e o para-raios. Esta montagem é uma herança das ligações realizadas com para-raios fabricados a base de carboneto de silício (SiC) devido a presença de correntes subsequentes após a atuação do mesmo. Dessa forma, o elo fusível tinha a função, também, de limitar tal corrente.

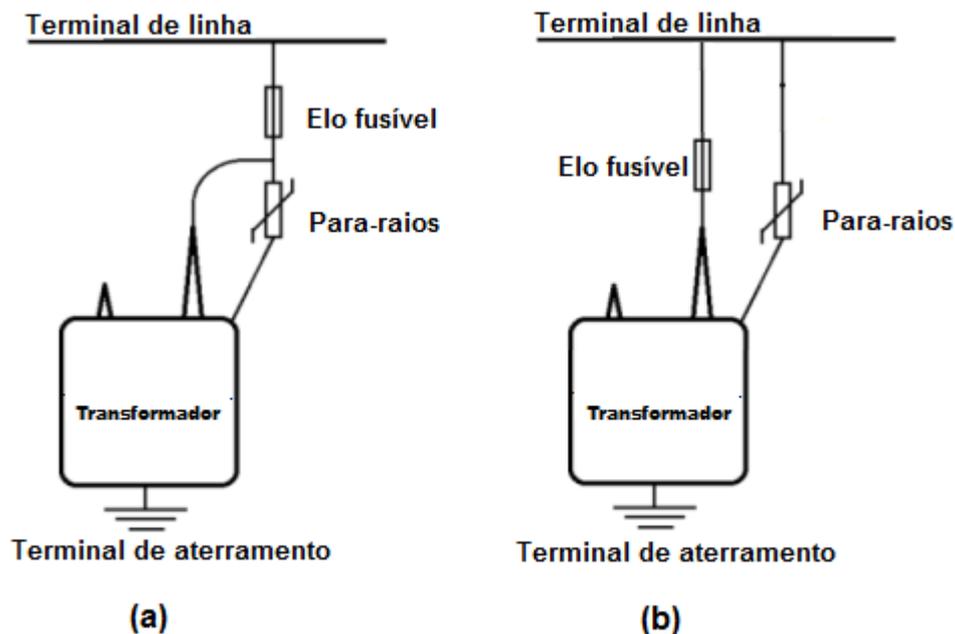


Fig. 4.3 - Esquemas de ligação do para-raios na proteção do transformador.

Os para-raios modernos são produzidos a base de óxido de zinco (ZnO). São denominados de para-raios de óxido metálico e uma de suas características é a ausência de correntes subsequentes. Porém, são dispositivos percorridos continuamente por uma corrente de fuga. Logo, esse tipo de proteção com elo fusível de retaguarda deve ser evitada, visto que a utilização de um elo fusível nesta configuração é um problema, principalmente durante as sobretensões ou no processo de degradação do para-raios – se o desligador não atuar corretamente o elo fusível possivelmente irá operar e desligar a linha desnecessariamente.

A utilização da configuração apresentada na Fig. 4.3(a) criou um senso comum que o desligador automático e o elo fusível devem coordenar. Porém, isso não é verdade. Ambos os elementos apresentam funções diferentes e, como afirmado pelas normas vigentes, “os desligadores não são elementos fusíveis e não são projetados para atuar como tal [15, 16, 17]. Servem para prover a desconexão física de um para-raios defeituoso da rede, eliminando a

conexão ao terra. O desligador não tem por objetivo coordenar com nenhum dispositivo de proteção contra sobre correntes da rede”. Ou seja, os desligadores não apresentam funções de proteção na rede.

É possível evitar tais problemas utilizando outro esquema de ligação, mais adequado para os para-raios de óxido metálico comum em várias redes. Neste arranjo, o para-raios é ligado em paralelo com a associação em série entre o elo fusível e o transformador, conforme Fig. 4.3 (b). Neste caso, as correntes que levam à atuação do desligador e do elo fusível (chave-fusível) do transformador são distintas.

4.3 - Proposta do trabalho

A partir dos problemas associados à operação do desligador convencional, esta tese propõe a utilização de desligadores automáticos baseados no princípio de atuação de elementos fusíveis. Fusíveis são dispositivos relativamente simples cujo princípio de operação está associado a um material condutor com área da seção transversal insuficiente para transportar correntes tão elevadas quanto as que percorrem o circuito protegido. Dessa forma, quando necessário, o fusível é sacrificado para prevenir ou atenuar danos ao circuito protegido.

Dependendo da característica da corrente nominal, o fusível é construído com um ou mais elementos que se fundem e depois vaporizam quando são percorridos por correntes excessivas durante determinado tempo. Em seguida, o arco ou os arcos resultantes devem ser extintos para concluir a interrupção. Trata-se de dispositivos que apresentam ótimos tempos de atuação, logo, podem ser projetados para interromper com segurança as correntes de curto-circuito mais elevadas, limitando a energia dissipada durante esses períodos. Esse comportamento, no entanto, é dependente da forma de onda da corrente.

Um tempo específico de operação só pode ser atribuído a determinado valor eficaz de corrente se a sua forma de onda estiver definida. Em virtude disso, a Equação 4.3, chamada de integral temporal ou integral de Joule, é utilizada. Ela considera o quadrado da corrente instantânea que flui através de um fusível desde o instante em que ocorre o curto-circuito até a extinção do arco no fusível.

$$I^2t = \int i^2 dt . \quad (4.3)$$

Mesmo não considerando o valor da resistência, a Equação 4.3 normalmente é associada com a energia que o fusível deixa passar. Esse termo foi designado a partir de uma condição relativa às resistências dos componentes do circuito percorridos pela corrente: se

essas resistências permanecerem constantes durante todo o período de operação do fusível, o valor da integral de Joule é proporcional à energia entregue ao circuito. Todavia, na prática, as resistências normalmente aumentam devido ao aquecimento provocado pelas correntes.

Outra característica dos fusíveis é a curva tempo/corrente. Essa curva relaciona o tempo de pré-arco com a corrente presumida. Além disso, também é possível determinar a corrente mínima de ruptura, normalmente indicada através de uma linha completa acima desse nível e uma linha tracejada abaixo dele, conforme ilustrado nas curvas apresentadas na Fig. 4.4.

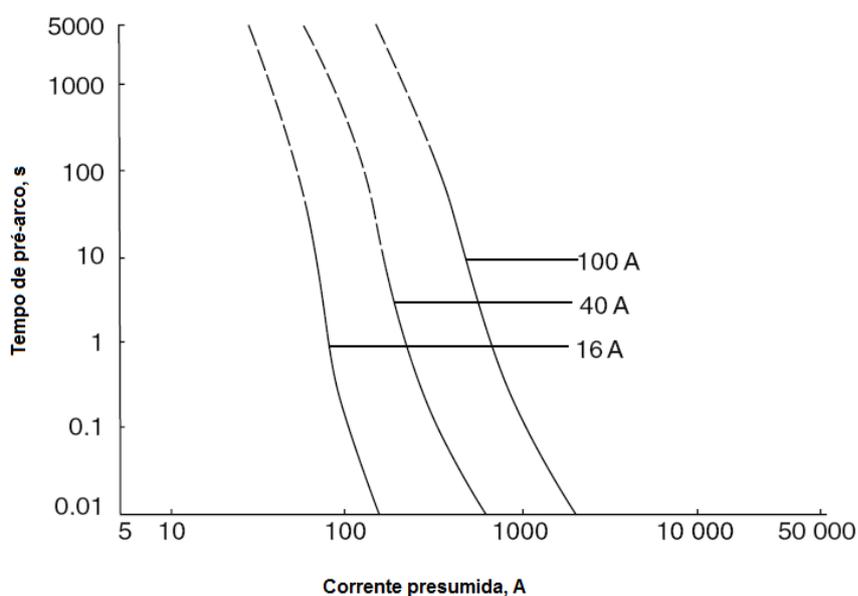


Fig. 4.4 – Curva característica tempo/corrente.

Um dos fusíveis utilizados em sistemas de média tensão é o tipo expulsão. Tal dispositivo é desenvolvido basicamente por elementos compostos por estanho ou cobre estanhado e, por definição, é para uso em sistemas CA e opera com tensões nominais superiores a 1000 V. É desenvolvido apenas para uso externo sendo capaz de operar em uma ampla faixa de corrente de curto-circuito. Trata-se de um dispositivo projetado para operar em circuitos trifásicos com corrente e tensão de linha de até 100 A e 72 kV, respectivamente.

Esses fusíveis são compostos por elementos fusíveis curtos e apresentam meios para alongar o arco elétrico que evitam a sua reinicialização após a passagem da corrente pelo zero. Além disso, seu desempenho durante a ruptura não é tão afetado pelos parâmetros do elemento fusível, permitindo obter diferentes características tempo/corrente através de alterações em sua estrutura. Dessa forma, é possível dimensionar elementos fusíveis capazes de atuar de acordo com as correntes de descarga dos para-raios, definindo-se ao menos três características diferentes de modo a atender aos requisitos de norma.

Este trabalho, portanto, pretende apresentar o desenvolvimento de um novo desligador baseado na tecnologia consolidada usada no desenvolvimento de elementos fusíveis, partindo da adaptação de dispositivos existentes no mercado.

Neste desenvolvimento, será mostrado o processo de elaboração, através da caracterização do elemento fusível, planejamento e execução de ensaios, e análise estatística de sua confiabilidade.

4.4 - Comentários

Neste capítulo tratou-se das falhas associadas aos desligadores automáticos convencionais. Problemas relacionados com o nível da corrente de atuação são observados desde o surgimento desses dispositivos. Além disso, estudos mais recentes mostram que durante a atuação do desligador ocorre o lançamento indesejado de fragmentos provocando riscos de acidentes em transeuntes.

A operação correta do desligador automático representa uma redução de custos para as concessionárias, principalmente quando se considera que o desligador automático apresenta um valor médio em torno de apenas 5% do para-raios. Ou seja, condena-se o componente principal pela atuação incorreta de um acessório. Além disso, também são considerados os gastos com a equipe de manutenção que irá substituir o equipamento, repassados, de certa forma, ao consumidor através das revisões tarifárias.

Uma maneira para evitar esses problemas é modificar o princípio de atuação do desligador evitando que ele atue através de uma explosão por meio da cápsula contendo pólvora. A ideia é desenvolver um desligador que seja preciso nos níveis de atuação, robusto o suficiente para suportar as correntes mínimas estabelecidas nas normas vigentes e sensível o suficiente para atuar durante a elevação da corrente de fuga permanente antes que a proteção da linha atue.

CAPÍTULO 05

DESLIGADOR AUTOMÁTICO ELETROMECAÂNICO

Considerando os problemas associados aos desligadores convencionais, neste capítulo é apresentada uma nova proposta de projeto do desligador automático. Serão desenvolvidos e avaliados três modelos de desligadores, onde cada um deles irá operar em condições de serviço conforme especificadas nas normas vigentes [15, 16, 17]. São elas:

- Serviço leve
- Serviço normal
- Serviço pesado

Com isso, pretende-se suprimir as limitações técnicas verificadas para os desligadores convencionais, os quais afetam o desempenho dos para-raios de óxido metálico utilizados nas redes de média tensão.

O novo desligador, chamado de desligador automático eletromecânico (ou desligador eletromecânico), substitui o circuito interno e o cartucho com pólvora por um elemento fusível. Baseia-se no seccionamento através da abertura do elemento fusível, amplamente utilizado em redes de média tensão [32].

A ideia é desenvolver um dispositivo robusto que suporte as correntes mínimas estabelecidas pela ABNT, IEC e ANSI [15, 16, 17], mas que seja sensível o suficiente para atuar em condições de falha do para-raios durante a elevação da corrente de fuga permanente antes que a proteção da linha atue.

O elemento fusível é um componente que se funde quando submetido a correntes que resultam em um valor específico de RI^2 . As dimensões e a resistividade da liga que compõe

este elemento determinam a característica “tempo versus corrente” [33]. No caso do projeto em questão, o elemento fusível é, na verdade, composto por dois elementos, com características distintas, associados em série. Um deles deve romper apenas quando submetido a um valor específico de impulso de corrente, enquanto que o outro deve romper para sobrecorrentes em frequência industrial, de acordo com o grau de degradação do para-raios.

O desenvolvimento do desligador foi realizado a partir de resultados de ensaios. Inicialmente foi observado o comportamento do desligador convencional frente à correntes na frequência industrial, bem como seu desempenho frente à impulsos de corrente. Determinado o desempenho do desligador convencional, os mesmos ensaios foram realizados em vários conjuntos de elos fusíveis com características distintas, modificando a estrutura interna do elemento fusível.

Em seguida, foram selecionados os modelos dos elos que se adequavam as condições de serviço leve, normal e pesada. Finalmente, foram desenvolvidos três modelos de desligadores e verificado o desempenho frente à impulsos de corrente, correntes na frequência industrial, tensão de rádio interferência (RIV) e ensaio de envelhecimento sob tensão de operação simulando condições ambientais.

A suportabilidade frente à impulsos de corrente, de todos os dispositivos analisados, foi verificada através de uma adaptação do método originalmente proposto por Dixon e Mood [34] denominado acréscimos e decréscimos (*Up-and-Down Tests*). Trata-se de uma metodologia bastante difundida na área de engenharia elétrica de alta tensão envolvendo tensões e correntes impulsivas [13, 35, 36, 37].

A partir do ensaio de *Up-and-Down*, foi possível determinar os limites mínimo e máximo das correntes de ruptura, bem como o respectivo valor médio. Tais resultados foram obtidos através de procedimentos probabilísticos fazendo uso da distribuição *Weibull* associada ao método de verossimilhança.

5.1 - Ensaios no desligador convencional

Um conjunto composto por 30 (trinta) amostras de desligadores convencionais foi submetido ao ensaio de “*Up-and-Down*”. Tratam-se de dispositivos fabricados nos Estados Unidos e projetados para operarem sob condições de serviço pesado . Como resultado, foram obtidos os valores de corrente de ruptura mínimo (I_{\min}), médio ($I_{50\%}$) e máximo (I_{\max}). A Tabela 5.1 mostra o resultado do ensaio, em que:

- V - tensão de carga do gerador (kV);
- I - corrente medida (kA);
- X - indica que o dispositivo ensaiado atuou;
- O - indica que o dispositivo ensaiado suportou a aplicação do impulso de corrente.

Tabela 5.1 - *Up-and-Down* em desligadores automáticos convencionais.

		Amostra														
V[kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
70																
65					X		X				X				X	
60		X		O		O		X		O		X		O		
55	O		O						O				O			
I[kA]	58,4	64,0	58,4	64,0	70,0	64,0	70,0	64,0	58,4	64,0	70,0	64,0	58,4	64,0	70,0	
V[kV]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
70			X													
65		O		X		X				X		X		X		
60	O				O		X		O		O		O		O	
55								O								
I[kA]	64,0	70,0	74,4	70,0	64,0	70,0	64,0	58,0	64,0	70,0	64,0	70,0	64,0	70,0	64,0	

Da Tabela 5.1 são obtidos o valor médio da corrente suportada pelo desligador automático convencional, $I_{50\%}$, e o respectivo desvio padrão, σ :

- $I_{50\%} = 65,7$ kA;
- $\sigma = 3,4$ kA.

Com esse resultado é possível determinar, estatisticamente, um intervalo de confiança da corrente de atuação do desligador de 99,99% entre I_{\min} e I_{\max} . Sendo eles 52,1 kA e 79,3 kA, respectivamente. Observa-se que este desligador apresenta possibilidade de atuação de 0,01 % para impulsos de corrente com amplitudes inferiores a 52,1 kA. Contudo, ele não suportará correntes com amplitudes superiores a 79,3 kA. Tal desempenho não é suficiente para que o desligador opere com para-raios projetados para as condições de serviço normal ou pesada. Sua performance indica apenas que o desligador irá operar de forma adequada quando submetido a condições de serviço leve.

Verificado o comportamento do desligador automático convencional frente à impulsos de corrente, foi observado seu desempenho frente à correntes na frequência industrial através da curva característica “Tempo versus Corrente”, conforme ilustra a Fig. 5.1.

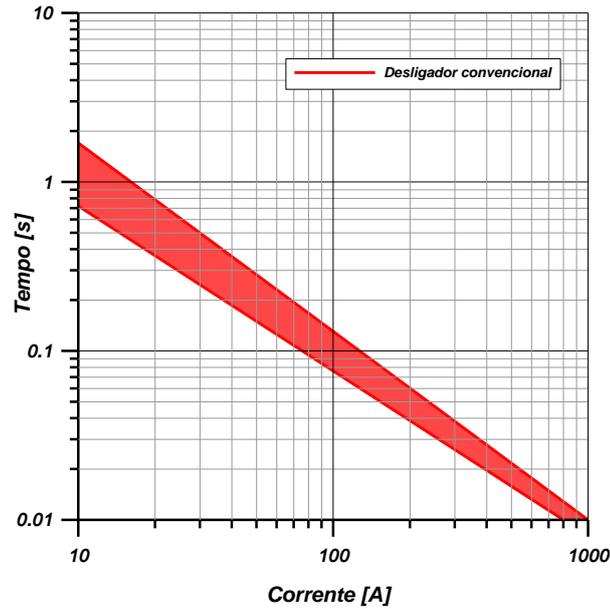


Fig. 5.1 - Curva característica “Tempo versus Corrente na frequência industrial” do desligador automático convencional.

Determinados os valores de $I_{\text{mín}}$, $I_{50\%}$ e $I_{\text{máx}}$ e a característica do desligador convencional frente à correntes na frequência industrial, a etapa seguinte foi desenvolver um dispositivo que apresente comportamento elétrico em conformidade com as normas vigentes [15, 16, 17].

5.2 - Proposta do desligador eletromecânico

A primeira abordagem foi dimensionar um cilindro condutor oco com um anel central de menor seção (Fig. 5.2), uma espécie de fusível para altas correntes. O anel deveria fundir instantaneamente durante um elevado pico de corrente, ou gradualmente no caso de incrementos na corrente de fuga permanente.

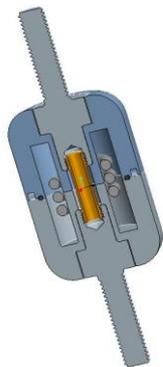


Fig. 5.2 (a) - Desenho em 2D da proposta inicial do desligador eletromecânico.



Fig. 5.2(b) - Desenho em 3D da proposta inicial do desligador eletromecânico.

A ideia baseia-se no princípio de operação dos elementos fusíveis, conforme mencionado no tópico 4.2. No entanto, essa primeira ideia foi logo substituída por uma alternativa mais simples e mais barata através do uso de elementos fusíveis convencionais utilizados para fins especiais. Estes dispositivos apresentam características únicas. Ao contrário dos convencionais, eles são dimensionados para atuar com características específicas de corrente. Neste caso, o elemento fusível deve operar a partir de um determinado valor de surto de corrente ou devido ao aumento gradual da corrente de fuga.

O desafio, neste caso, está na obtenção de um elo fusível capaz de suportar as correntes de fuga associadas a sobretensões temporárias, sem atuação indevida, mas atuando corretamente de acordo com o nível de corrente de descarga suportável definida para o para-raios.

5.3 - Ensaios realizados em elos fusíveis convencionais

Os elos fusíveis analisados inicialmente foram testados a partir do método “*Up-and-Down*”, ou seja, o mesmo procedimento utilizado para avaliar os desligadores convencionais. Através desse método é possível determinar a suportabilidade das amostras quando submetidas a impulsos de corrente. A curva característica “Tempo versus Corrente na frequência industrial” também foi determinada.

Inicialmente foram analisados quatro grupos (EF₁, EF₂, EF₃, EF₄) de elos fusíveis desenvolvidos por um fabricante nacional. Na Tabela 5.2 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados nesses dispositivos, bem como, a título de comparação, o resultado do ensaio realizado no desligador automático convencional. No Anexo 1 estão apresentados os resultados detalhados dos ensaios de “*Up-and-Down*” realizados nos quatro grupos de elos fusíveis.

Tabela 5.2 - Valores de corrente de ruptura obtidos dos ensaios de “*Up-and-Down*” realizados nos elos fusíveis e no desligador convencional.

Amostra	Corrente [kA]			
	Corrente Mínima	Corrente média	Corrente máxima	Desvio padrão
DC ⁽¹⁾	52,1	65,7	79,3	3,5
EF ₁	6,30	7,50	8,70	0,3
EF ₂	10,1	11,3	12,5	0,3
EF ₃	29,1	36,7	44,3	1,9
EF ₄	53,4	64,6	75,8	2,8

¹DC – Desligador Convencional

Os resultados apresentados na Tabela 5.2 mostram que, em termos de corrente de ruptura, há uma semelhança entre a corrente do desligador convencional e a corrente do elo fusível do grupo EF₄. Esse comportamento é um indicativo de que é possível desenvolver desligadores automáticos para para-raios de distribuição utilizando elos fusíveis. Isso possibilitaria em uma coordenação eficaz entre a operação do para-raios e a operação do desligador, resultando na redução de para-raios retirados de campo de forma inadequada, ou seja, em bom estado de funcionamento.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios, nota-se que os elos fusíveis convencionais não foram capazes de atender plenamente aos requisitos necessários para atuarem como desligadores automáticos, gerando a necessidade de utilizar elos fusíveis com características especiais. Em virtude disso, foi iniciada uma parceria com um fabricante nacional de elos fusíveis, distinto do fabricante anterior, voltada ao projeto do desligador eletromecânico. Desta vez foram analisados seis grupos de elos fusíveis.

Os grupos foram identificados como EF_{(B)1}, EF_{(B)2}, EF_{(B)3}, EF_{(B)4}, EF_{(B)5} e EF_{(B)6}. Onde a letra B indica a mudança de fabricante do elo fusível. Todas as características obtidas frente à corrente na frequência industrial foram confrontadas com a característica do desligador convencional. Na Fig. 5.3 estão apresentadas algumas dessas curvas.

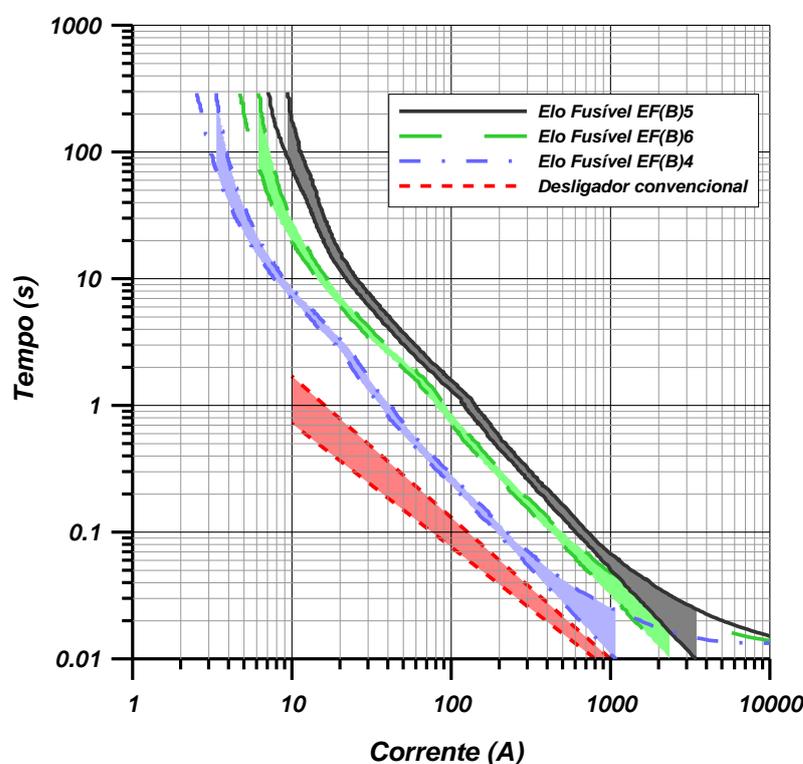


Fig. 5.3 - Curvas características “tempo versus corrente na frequência fundamental”.

De acordo com a Fig. 5.3, o desligador convencional tem um tempo de atuação inferior ao tempo de atuação dos elos fusíveis. No entanto, as duas curvas apresentam comportamento adequado, visto que, conforme norma [15, 16, 17], “os desligadores não são elementos fusíveis e não são projetados para atuar como tal. Servem para prover a desconexão física de um para-raios defeituoso da rede, eliminando a conexão ao terra e efetuando a sinalização da falha do para-raios.

O desligador não tem por objetivo coordenar com nenhum dispositivo de proteção contra sobrecorrentes da rede”. Isto pode ser melhor verificado considerando-se os esquemas de conexão entre o para-raios e a chave-fusível ligada ao transformador (ver Fig. 5.4): nota-se que, para esta configuração, as correntes que levam à atuação do desligador e da chave-fusível do transformador são distintas.

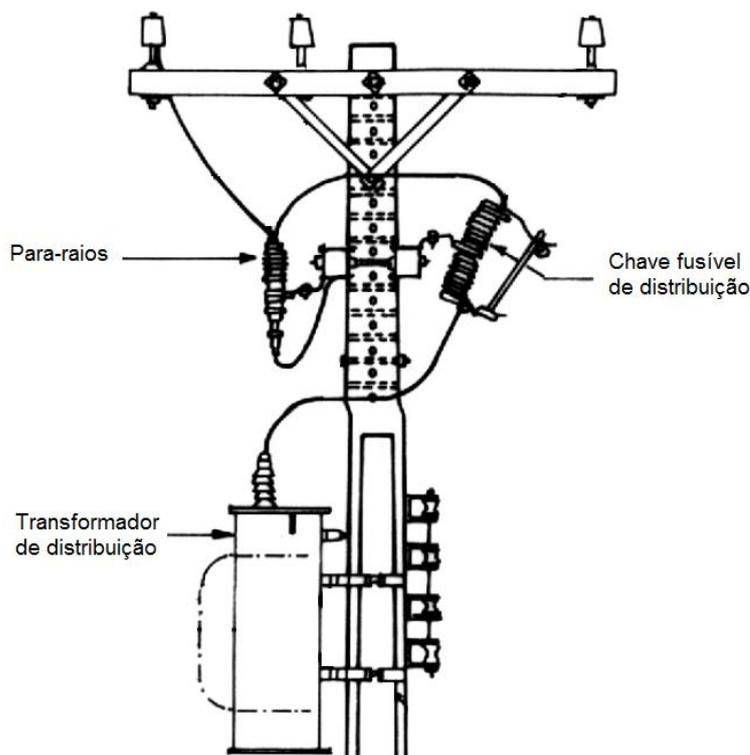


Fig. 5.4 - Esquema de ligação envolvendo o para-raios, a chave fusível e o transformador. Adaptado da NBR 5434 [38].

Todos os elos fusíveis foram submetidos ao ensaio de “*Up-and-Down*”. A partir dos resultados dos ensaios, verifica-se que os primeiros conjuntos de dispositivos ensaiados suportaram amplitudes de corrente inferiores ao necessário. Contudo, a medida que foram realizadas modificações na estrutura do elemento fusível os resultados foram se aproximando dos valores desejados. Na Tabela 5.3 estão apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios. Os resultados detalhados estão inseridos no Anexo 2.

Tabela 5.3 - Valores de Corrente, em kA, obtidos no ensaio de “Up-and-Down” realizado em elos fusíveis.

Amostra	Corrente [kA]			
	Corrente Mínima [I _{mín}]	Corrente Média [I _{50%}]	Corrente Máxima [I _{máx}]	Desvio Padrão [σ]
EF _{(B)1}	15,0	15,8	16,6	0,21
EF _{(B)2}	15,0	15,8	16,6	0,21
EF _{(B)3} ^(*)	31,9	32,5	33,1	0,16
EF _{(B)4}	38,0	54,0	70,0	4,0
EF _{(B)5}	55,7	92,5	129,3	9,2
EF _{(B)6}	64,0	89,2	114,4	6,3

*O resultado não será considerado, visto que o número de amostras foi insuficiente [35].

Da Tabela 5.3 é possível concluir que as características elétricas dos grupos EF_{(B)4}, EF_{(B)5} e EF_{(B)6} apresentam níveis mínimos de corrente mais adequados às condições de serviço leve e normal. A partir desses resultados, será possível, através de alterações na estrutura do elemento fusível, desenvolver três tipos de desligadores eletromecânicos. Cada desligador será desenvolvido para operar de forma adequada em condições específicas de serviço, conforme classificam as normas vigentes [15, 16, 17]. Dessa forma, serão produzidos desligadores capazes de operar de modo eficaz quando submetidos às condições de serviço leve, normal ou pesada.

Foi observado que o elo fusível do grupo EF_{(B)6} apresenta comprimento superior ao comprimento do invólucro do desligador eletromecânico, impossibilitando sua conexão sem que haja dano à estrutura do elemento fusível. Em virtude disso, o elo fusível pertencente a esse grupo não será utilizado no desenvolvimento do desligador eletromecânico.

Durante o processo de fabricação dos desligadores é provável que ocorra alteração na suportabilidade devido ao pré-tensionamento dos elementos fusíveis em função da montagem. Portanto, resultados mais precisos só serão alcançados após a realização de ensaios na montagem final dos desligadores.

O desligador eletromecânico compreende essencialmente um invólucro constituído de duas partes acopláveis entre si, provido de terminais de contato elétrico, um elemento fusível compondo a parte ativa e uma mola. A função da mola é proporcionar a desconexão entre o terminal de linha e o terminal de aterramento após a atuação (ruptura) do elemento fusível indicando visualmente a operação do desligador.

A Fig. 5.5 apresenta a evolução do invólucro do desligador eletromecânico durante o desenvolvimento da Tese. A primeira versão do invólucro está apresentada na Fig. 5.5 (a). Nota-se que, de acordo com as Figs. 5.5(b) e 5.5(c), modificações foram realizadas no decorrer do trabalho.

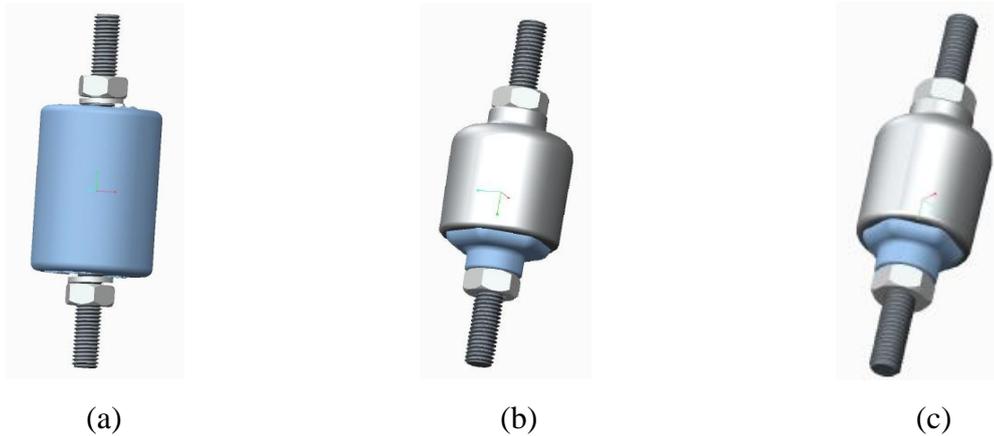


Fig. 5.5 - Evolução do invólucro do desligador eletromecânico.

Considerando que o elemento fusível será alojado ao invólucro, o resultado final irá contemplar o conjunto completo do desligador. Na Fig. 5.6 está apresentada a fotografia da versão final do desligador eletromecânico, bem como sua parte ativa.



Fig. 5.6 (a) - Desligador eletromecânico.



Fig. 5.6(b) - Parte ativa do desligador eletromecânico.

As extremidades do elemento fusível são conectadas a parafusos metálicos de modo que possam ser ligadas ao para-raios e ao terminal de terra.

5.4 - Avaliação do desempenho do desligador

O comportamento dos elos fusíveis pertencentes aos grupos $EF_{(B)4}$, $EF_{(B)5}$ e $EF_{(B)6}$, frente à impulsos de corrente e na frequência industrial, é um indicativo de que é possível desenvolver desligadores automáticos utilizando elementos fusíveis compondo a parte ativa.

Em virtude disso, foram desenvolvidos 3 (três) modelos de desligadores eletromecânicos. Cada modelo apresenta características específicas de acordo com a condição de serviço na qual será submetido em campo. Os desligadores foram identificados como serviço leve, serviço normal e serviço pesado.

A avaliação do desempenho foi realizada, inicialmente, por meio de análises estatísticas a partir de resultados de ensaios de “*Up-and-Down*”. Em seguida, amostras novas serão submetidas a aplicação de dois impulsos de corrente de acordo com a sua característica específica de condição de serviço. Ou seja, os desligadores classificados como serviço leve deverão suportar dois impulsos de 40 kA, os denominados de serviço normal terão que suportar dois impulsos de 65 kA e os denominados serviço pesado deverão suportar dois impulsos de 100 kA. Por fim, novos desligadores serão submetidos ao ensaio de RIV e de envelhecimento sob tensão de operação simulando condições ambientais.

5.4.1 - Avaliação estatística dos ensaios de “*Up-and-Down*”

O desempenho dos desligadores frente à impulsos de corrente foi verificado através de procedimentos estatísticos envolvendo os resultados dos ensaios de “*Up-and-Down*”. Em virtude das características dos resultados, eles foram tratados através do uso da distribuição *Weibull* associada ao método de máxima verossimilhança.

Os ensaios foram realizados com formas de onda padronizadas [15], onde os equipamentos foram ajustados para que os valores dos impulsos de corrente ficassem dentro dos seguintes limites:

- a) de 90% a 110% do valor de crista especificado;
- b) de 3,6 μ s a 4,4 μ s no tempo virtual de frente;
- c) de 9 μ s a 11 μ s no tempo virtual de cauda.

Na Fig. 5.7 é apresentada uma fotografia de dois desligadores eletromecânicos registrada após a realização de um dos ensaios de “*Up-and-Down*”. Nota-se que em uma das imagens o desligador não atuou durante a aplicação do impulso. Já na outra, houve atuação do desligador. Contudo, verifica-se que o invólucro do desligador que atuou durante a aplicação do impulso não foi danificado. Isso é um indicativo de que durante a atuação do desligador eletromecânico não há lançamento de fragmentos do invólucro, garantindo a segurança de transeuntes e equipamentos instalados próximos ao desligador automático.



Fig. 5.7 - Desligador eletromecânico antes e depois da atuação.

A Tabela 5.4 mostra o resultado da sequência de “Up-and-Down” para os desligadores do tipo serviço leve.

Tabela 5.4 - Up-and-Down no desligador eletromecânico do tipo serviço leve.

	Amostra															
V[kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
42,0	X		X		X		X		X		X		X		X	
41,5		O		O		O		O		O		O		O		O
I[kA]	70	69	70	69	70	69	70	69	70	69	70	69	70	69	70	69
V[kV]	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
42,0	X		X		X		X		X		X		X		X	
41,5		O		O		O		O		O		O		O		O
I[kA]	70	69	70	69	70	69	70	69	70	69	70	69	70	69	70	69

Da Tabela 5.4 são obtidos o valor médio da corrente suportada pelo desligador, $I_{50\%}$, e o respectivo desvio padrão, σ :

- $I_{50\%} = 69,4 \text{ kA}$;
- $\sigma = 0,3 \text{ kA}$.

Com estes resultados é possível determinar, estatisticamente, um intervalo de confiança de 99,99% entre os valores críticos da corrente de atuação do desligador, sendo eles 68,2 kA e 70,6 kA, respectivamente. Ou seja, apenas 0,01% das amostras atuaram para valores inferiores a 68,2 kA, de modo que este desligador adéqua-se aos valores mínimos de 40 kA ou 65 kA requeridos para os desligadores do tipo serviço leve ou serviço normal. Todos os desligadores que atuaram o fizeram de modo suave e sem lançamento de estilhaços ou componentes. O gráfico da Fig. 5.8 ilustra a distribuição dos dados obtida.

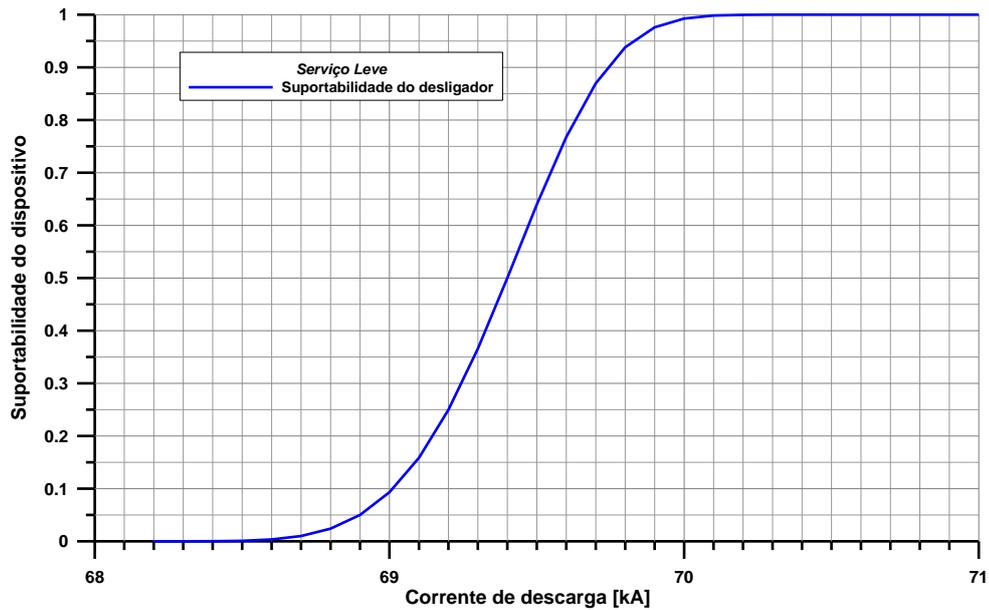


Fig. 5.8 - Gráfico da função de distribuição cumulativa (FDC) *Weibull* relativo ao desligador serviço leve.

Determinada a corrente média e os limites de operação do desligador, foi realizado o teste de suportabilidade que consiste na aplicação de dois impulsos de alta corrente no valor especificado para o tipo de desligador. Os desligadores ensaiados suportaram dois impulsos de 40 kA, mas não suportaram dois impulsos de 65 kA. Portanto, como resultado final, o desligador é considerado um desligador do tipo serviço leve.

Para o ensaio de “*Up-and-Down*” realizado nos desligadores denominados de serviço normal, foi obtida a Tabela 5.5, da qual foram obtidos os seguintes resultados:

- $I_{50\%} = 104 \text{ kA}$;
- $\sigma = 2,6 \text{ kA}$.

Tabela 5.5 - *Up-and-Down* no desligador eletromecânico do tipo serviço normal.

		Amostra														
V[kV]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
65		X							X							
64				X				O		X		X				
63			O		X		O				O		X		X	
62						O								O		O
61																
60																
I[kA]		108	104	106	105	102	104	105	107	106	104	105	104	102	104	102

V[kV]		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
65																
64									X		X		X		X	
63		X						O		O		O		O		O
62			X				O									
61				X		O										
60					O											
I[kA]		104	102	101	99	101	102	104	106	104	106	103	105	103	106	103

Os valores mínimo e máximo de atuação do desligador são 93,6 kA e 114,4 kA. Logo, apenas 0,01% das amostras aturariam para valores inferiores a 93,6 kA, de modo que este desligador adéqua-se com segurança ao valor mínimo de 65 kA requerido para os desligadores do tipo serviço normal. O gráfico da Fig. 5.9 ilustra a distribuição dos dados obtida.

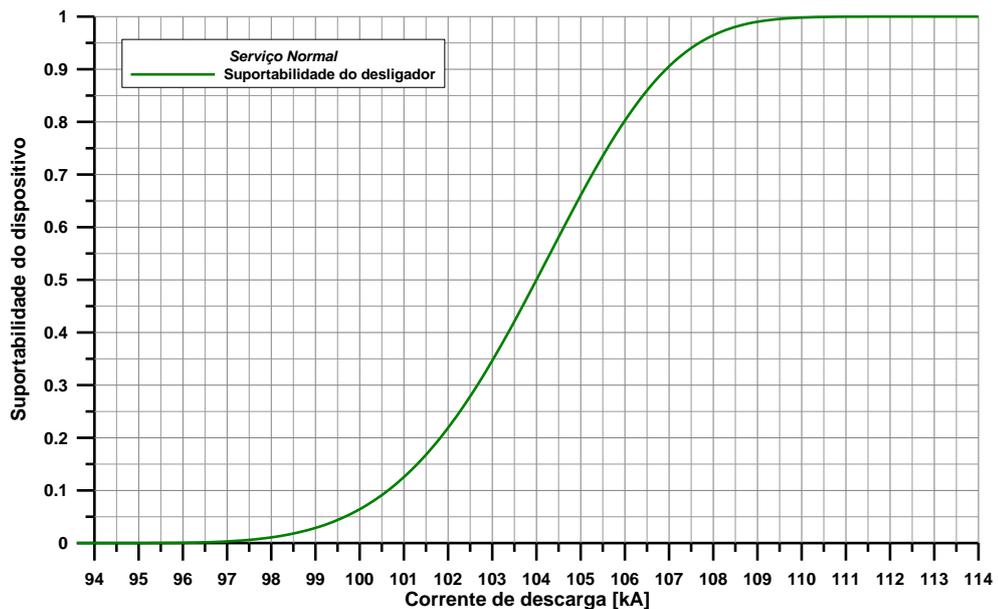


Fig. 5.9 - Gráfico da função de distribuição cumulativa (FDC) *Weibull* relativo ao desligador serviço normal.

Todos os desligadores que atuaram também o fizeram de modo suave e sem lançamento de estilhaços ou componentes.

Após a determinação da corrente média e dos limites de operação do desligador, foram aplicados dois impulsos de 65 kA na forma 4/10 μ s em novas amostras. Os desligadores não atuaram durante a aplicação dos impulsos. Portanto, como resultado final, o desligador é considerado do tipo serviço normal.

Em relação ao desligador denominado de serviço pesado, a Tabela 5.6 apresenta o resultado da sequência de “Up-and-Down”.

Tabela 5.6 - Up-and-Down no desligador eletromecânico do tipo serviço pesado.

		Amostra														
V[kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
70,0				X		X		X		X		X				
67,5	X		O		O		O		O		O		X		O	
65,0		O												O		
I[kA]	112,0	105,6	110,4	112,8	110,0	112,0	110,0	115,2	110,4	114,4	109,6	113,6	110,4	104,8	110,4	
V[kV]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
70,0	X		X		X											
67,5		O		O		X		X		X		X		X		
65,0							O		O		O		O			
I[kA]	113,6	110,0	112,8	109,6	114,4	110,4	106,4	109,6	103,2	109,6	105,6	108,8	105,6	108,8		

Da Tabela 5.6 são obtidos o valor médio da corrente suportada pelo desligador, $I_{50\%}$, e o respectivo desvio padrão, σ :

- $I_{50\%} = 110,1$ kA;
- $\sigma = 1,2$ kA.

Considerando o intervalo de confiança de 99,99%, os limites de atuação foram de 105,3 kA e 114,9 kA. Nota-se que, em princípio, o desligador desenvolvido apresenta as características necessárias para operar corretamente quando submetido à condição de serviço pesado. O gráfico da Fig. 5.10 ilustra a distribuição dos dados obtida. Novamente, todos os desligadores que atuaram o fizeram de modo suave e sem lançamento de estilhaços ou componentes.

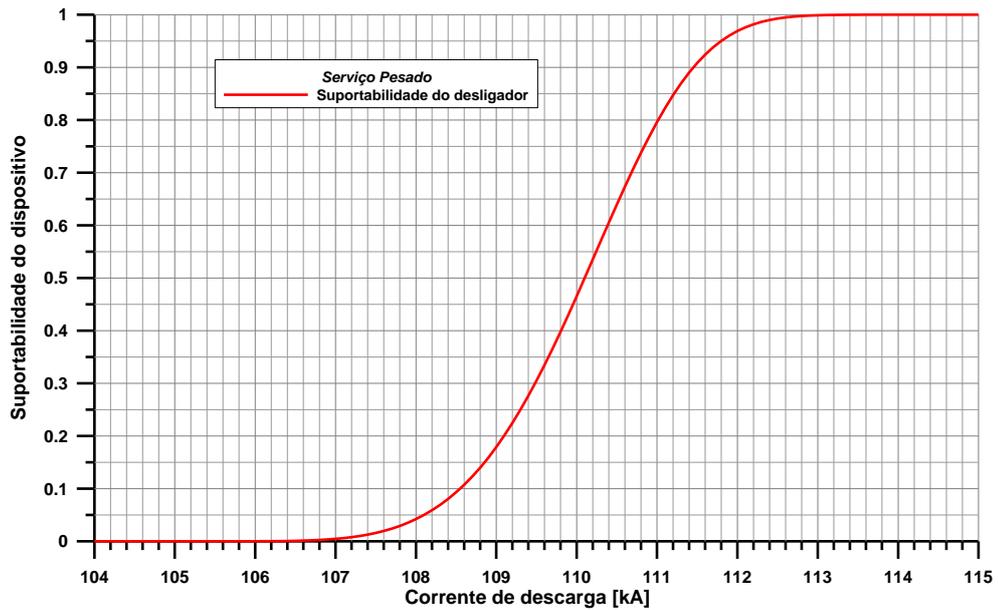


Fig. 5.10 - Gráfico da função de distribuição cumulativa (FDC) *Weibull* relativo ao desligador serviço pesado.

Determinada a corrente média e os limites de operação do desligador, foi realizado o teste de suportabilidade a altas correntes. Os desligadores ensaiados suportaram dois impulsos de 100 kA. Portanto, como resultado final, o desligador desenvolvido é considerado um desligador que apresenta características para operar sob condição de serviço pesado.

A Fig. 5.11 apresenta as curvas de suportabilidade dos desligadores eletromecânicos, bem como a curva do desligador convencional. Nota-se que apenas os desligadores eletromecânicos apresentam suportabilidades de acordo com o previsto nas normas vigentes [15, 16, 17].

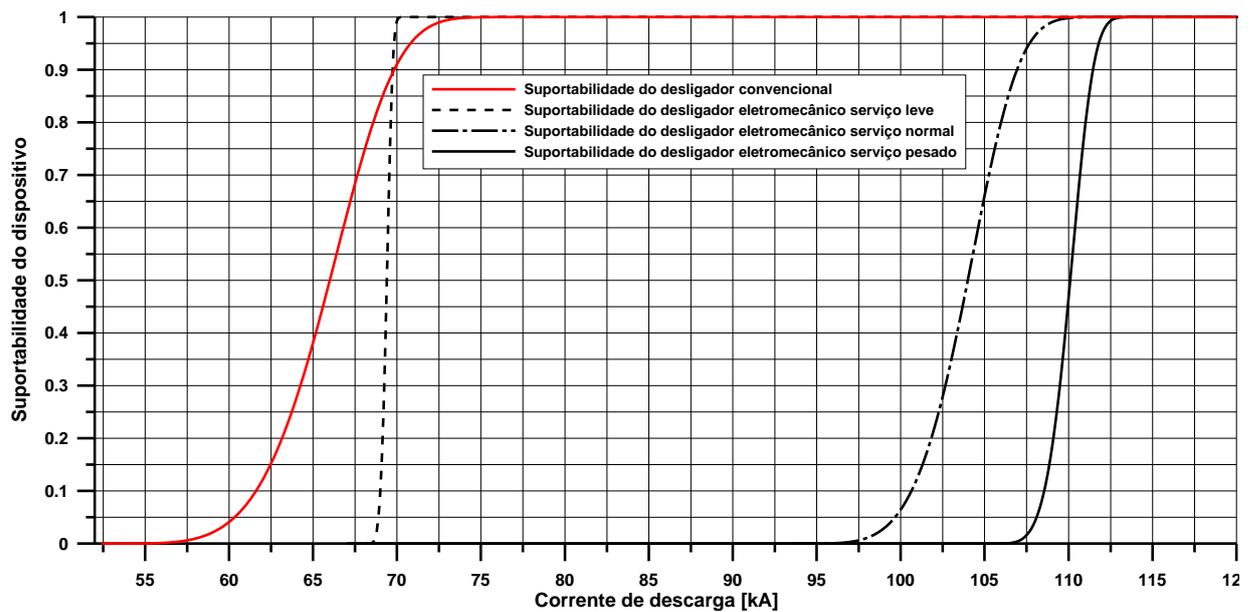


Fig. 5.11 - Curvas de suportabilidade dos desligadores automáticos.

Os resultados da avaliação estatística e do ensaio de suportabilidade a altas correntes corroboram para o projeto de desligadores automáticos relativos a para-raios de distribuição cuja parte ativa é composta por elementos fusíveis. Em razão disso, foi possível desenvolver desligadores automáticos eletromecânicos com características operacionais que garantem a operação em condições de serviço leve, normal ou pesada. Os resultados dos ensaios correspondem perfeitamente com os requisitos estabelecidos nas normas vigentes [15, 16, 17].

Nas amostras que não suportaram a aplicação do impulso, o desligador atuou corretamente resultando na separação das partes do invólucro e sinalizando sua atuação. Não foram observadas quebras em nenhuma das amostras.

A Tabela 5.7 apresenta o resultado da avaliação estatística realizada em todos os desligadores.

Tabela 5.7 - Valores de corrente de ruptura obtidos dos ensaios de “Up-and-Down” realizados nos desligadores eletromecânicos *serviço leve, serviço normal e serviço pesado*.

Amostra	Corrente [kA]		
	Corrente Mínima [I _{min}]	Corrente Média [I _{50%}]	Corrente Máxima [I _{máx}]
DE _(SERVIÇO LEVE)	68,2	69,4	70,6
DE _(SERVIÇO NORMAL)	93,6	104,0	114,4
DE _(SERVIÇO PESADO)	105,3	110,1	114,9

DE - Desligador Eletromecânico

5.4.2 - Comportamento do desligador eletromecânico frente à correntes na frequência industrial

Além da análise estatística apresentada anteriormente, outro parâmetro a ser observado, no que se refere ao desligador, é o desempenho frente a correntes na frequência industrial. Em razão disso, para efeito de comparação, na Fig. 5.12 estão apresentadas as curvas características de fusão “Tempo x Corrente” do desligador convencional e do elo fusível utilizado na fabricação do desligador eletromecânico DE_(SERVIÇO NORMAL).

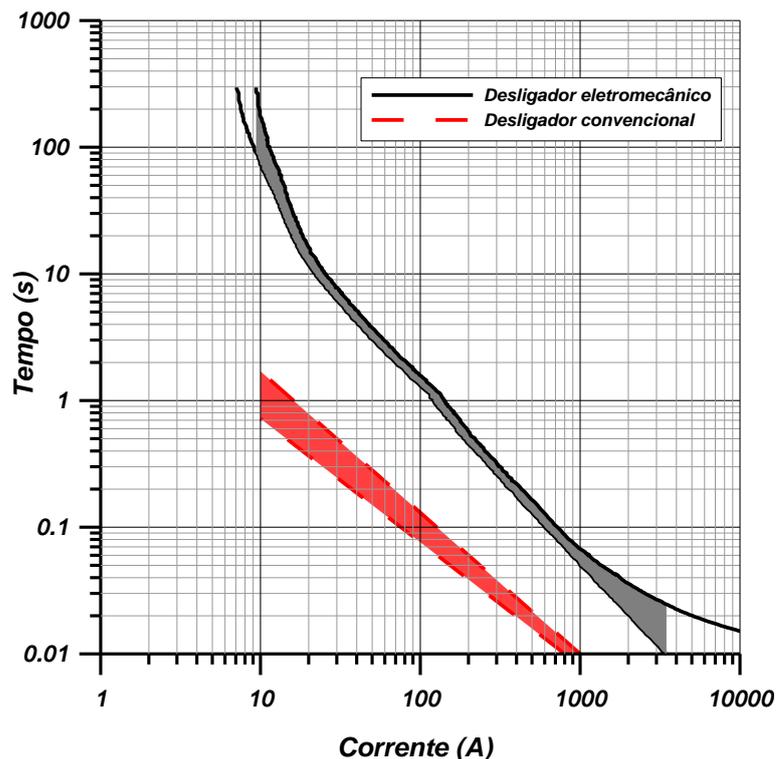


Fig. 5.12 - Curvas características de fusão “Tempo x Corrente” relativas aos desligadores.

De acordo com a Fig. 5.12, os desligadores convencionais têm um tempo de atuação inferior ao tempo de atuação do desligador eletromecânico. No entanto, como já mencionado, as duas curvas apresentam comportamento adequado, visto que a função do desligador é desconectar o para-raios defeituoso da rede. Além disso, ao passo que o desligador convencional é construído a base de pólvora, fatores ambientais, como umidade, irão provocar alterações no comportamento da curva característica.

5.4.3 - Ensaio de tensão de rádio interferência - RIV

A medição da Tensão de Rádio Interferência (RIV) tem por objetivo avaliar os ruídos em alta frequência produzidos pelo para-raios energizado, comparando o resultado obtido com os valores relativos às condições ambientais normais.

O desligador eletromecânico foi aprovado neste ensaio. Isso é um indicativo da qualidade do projeto desenvolvido e serve como base para verificar a degradação mecânica estrutural do dispositivo após solicitações de descarga de alta corrente com forma padronizada de 4/10 μ s.

5.4.4 - Ensaio de envelhecimento sob tensão de operação simulando condições ambientais

Esta avaliação foi realizada submetendo três amostras dos desligadores eletromecânicos (conectados a para-raios) a uma névoa salina. O ensaio foi realizado durante um período de 1000 horas com os dispositivos alimentados na tensão de operação contínua, conforme procedimentos da IEC 60099-4 [15]. O objetivo do ensaio é verificar, através de procedimentos acelerados, se o invólucro e o elemento fusível do desligador eletromecânico são comprometidos pela ação do ambiente. A Fig. 5.13 apresenta fotografias dos desligadores durante a realização do ensaio.



Fig. 5.13 (a) - desligadores eletromecânicos conectados aos para-raios



Fig. 5.13(b) - desligador eletromecânico conectado ao para-raios

Após o ensaio, os desligadores foram submetidos a impulsos de alta corrente de curta duração, com forma de onda 4/10 μ s e amplitudes de acordo com a sua classificação de serviço. Todos os desligadores suportaram aos impulsos de corrente.

A Fig. 5.14 apresenta fotografias dos desligadores após as aplicações dos impulsos. Nota-se que os dispositivos não atuaram e nenhuma mudança foi verificada em suas características após o ensaio de envelhecimento. Isso já era esperado, como elos fusíveis são fabricados supostamente para trabalhar ao ar livre, submetê-los à umidade, poluição e variação de temperatura não iria comprometer a sua característica.



Fig. 5.14 (a) - desligador eletromecânico.

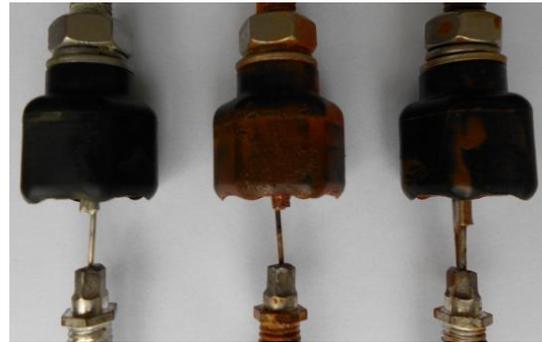


Fig. 5.14(b) - desligador eletromecânico.

5.5 - Comentários

O desenvolvimento de um desligador automático deve atender a dois diferentes fatores: o primeiro se refere à operação do desligador mediante correntes de natureza atmosférica. O segundo é relativo à operação do desligador na frequência industrial. No entanto, é necessário considerar que deve haver o equilíbrio entre esses fatores.

O desempenho em laboratório e em campo dos desligadores convencionais, analisado neste capítulo e no capítulo anterior, normalmente não cumpre os requisitos estabelecidos nas normas vigentes. Em tese, o desempenho desses desligadores está mais adequado às condições de serviço leve. Em virtude disso, neste capítulo foi apresentado e avaliado um novo projeto de desligador automático. Tal dispositivo apresenta sua parte ativa composta por elemento fusível e foi desenvolvido com o objetivo principal de reduzir a elevada taxa de falhas de para-raios associada à atuação indevida do desligador convencional.

Foram desenvolvidos três modelos de desligador com base nas solicitações dos diferentes regimes de trabalho dos para-raios de distribuição (ciclo leve, normal e pesado). Espera-se, com a sua aplicação, que o número de para-raios retirados do sistema, ainda em boas condições operacionais, seja reduzido significativamente, atenuando para a concessionária de energia os custos de reposição com esses dispositivos.

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o desligador eletromecânico não irá contribuir negativamente no desempenho do para-raios, reduzindo a taxa de falha atribuída ao desligador convencional. Neste caso, a taxa de falha irá depender apenas da suportabilidade dos varistores que compõem o para-raios.

No capítulo seguinte será analisada e discutida a análise da taxa de falha envolvendo o desligador eletromecânico e o desligador convencional.

CAPÍTULO 06

INFLUÊNCIA DO DESLIGADOR AUTOMÁTICO NO DESEMPENHO DO PARA-RAIOS

Os para-raios são projetados com base na sua capacidade de absorção de energia, cuja propriedade é dependente da tensão de operação, bem como na sua corrente de descarga nominal a qual está caracterizada pela amplitude e duração.

Normalmente, define-se a suportabilidade do para-raios como a capacidade que ele apresenta em suportar determinados níveis de corrente de descarga sem falhar. A suportabilidade está associada a sua capacidade de dissipar a energia produzida pelo surto [13, 39, 40]. Dessa forma, para aplicação em campo, é importante conhecer os possíveis níveis das correntes que são descarregadas nas regiões onde os equipamentos serão instalados.

Quando se trata de para-raios de distribuição também é preciso levar em consideração os efeitos dessas correntes no desligador automático.

No presente capítulo, será estimado o risco de falha de para-raios de distribuição considerando a influência do desligador automático. Para isso, foram utilizados desligadores convencionais e desligadores eletromecânicos desenvolvidos com base nas classificações de serviço apresentadas nas normas vigentes [15, 16, 17].

O estudo foi realizado através da análise estatística de dados relativos às descargas atmosféricas e limites de suportabilidade [27, 41, 42, 43, 44, 45].

Com respeito às descargas atmosféricas, os dados foram obtidos a partir da análise de campo realizada na região Sul do país. Já os limites de suportabilidade foram definidos segundo literaturas técnicas, normas vigentes e ensaios realizados no laboratório.

A partir do risco de falha é possível estimar o número de para-raios de determinada rede de distribuição de energia que provavelmente irá falhar, permitindo um melhor planejamento por parte das concessionárias em termos da necessidade de manutenção, estoque e especificação dos para-raios.

6.1 - Natureza estatística das correntes

Através de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado em parceria entre o Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luís Barreira Martinez e a AES Sul, foi realizado um levantamento estatístico das intensidades das correntes associadas às descargas atmosféricas na área de concessão da AES Sul, localizada no sul do país [1, 46, 47].

O levantamento estatístico das correntes foi realizado através de um estudo feito em aproximadamente 12.000 para-raios com centelhadores retirados de campo. Trata-se de um total de 15 sub-regiões incluindo áreas rurais e urbanas. Os para-raios foram abertos e as marcas presentes nos centelhadores, provocadas por descargas atmosféricas com polaridades positivas ou negativas, foram analisadas. Todos os para-raios foram identificados de acordo com o fabricante e a região na qual estavam instalados.

Foram adquiridos para-raios novos semelhantes aos retirados de campo e estes foram submetidos no laboratório a impulsos de corrente com valores conhecidos. Através da técnica de “*Etchings Comparisons*”, as marcas provocadas nos centelhadores foram confrontadas com as marcas presentes nos para-raios retirados de campo.

Através do software AUTOCAD[®] foi possível determinar a área das marcas mais evidentes provocadas pelas descargas atmosféricas nos centelhadores. A Fig. 6.1 ilustra a menor e a maior área, respectivamente, resultante da ocorrência de descargas atmosféricas em um para-raios retirado de campo.



Menor área = 1,3 mm²



Maior área = 42,2 mm²

Fig. 6.1 - Marcas em centelhadores provocadas por descargas atmosféricas [1].

A técnica de “comparação de marcas” permitiu estimar as amplitudes das correntes descarregadas nos para-raios na área de concessão da AES Sul.

As correntes foram analisadas estatisticamente, através do software MINITAB 14[®], a fim de determinar a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados obtidos. A melhor curva de distribuição foi selecionada a partir do critério de *Anderson Darling*. Quanto menor este índice, melhor a coesão dos pontos com a curva.

A análise estatística considerando o conjunto de dados das 15 sub-regiões resultou no perfil das correntes de descarga pertencente a toda área de concessão da AES Sul, como apresentado na Fig. 6.2.

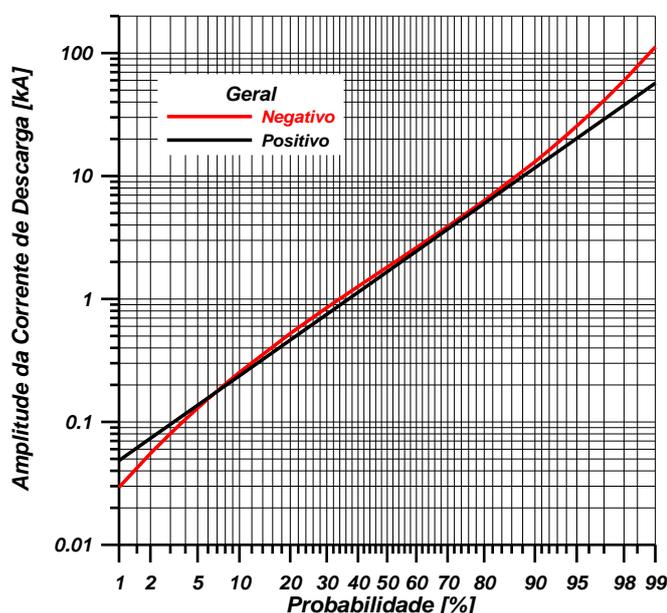


Fig. 6.2 - Probabilidade acumulada das descargas atmosféricas na região de concessão da AES Sul [1].

Na Fig. 6.2 a corrente mais provável é obtida para 50% de probabilidade, o que corresponde a 1,72 kA. A primeira vista, parece ser um valor pequeno. Mas duas observações devem ser consideradas: a primeira, os valores obtidos representam as correntes que foram efetivamente descarregadas pelos para-raios, isto é, não são as correntes reais oriundas dos raios. Em segundo lugar, o resultado da análise estatística envolvendo todo o conjunto de dados mostrou um melhor ajuste das correntes à função densidade de probabilidade *log-normal*. Conseqüentemente, o valor de 1,72 kA indica que a maior parte das descargas está concentrada em torno dele. Isso não significa que os valores em torno de 100 kA não são possíveis, eles são apenas os eventos mais raros.

A função densidade de probabilidade da distribuição *log-normal* é representada matematicamente pela Equação 6.1. Neste caso, o parâmetro μ é de 0,54 kA e o parâmetro σ é

igual a 1,57 kA, onde I é a corrente de descarga; μ , o parâmetro de localização e σ , o parâmetro de escala.

$$P_{LN}(I) = \frac{1}{I\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(I)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}, \quad (6.1)$$

onde:

$P_{LN}(I)$ - função densidade de probabilidade;

I - corrente descarregada através do para-raios;

μ - parâmetro de localização;

σ - parâmetro de escala.

A partir da Equação 6.1 foi possível levantar uma curva de densidade de probabilidade. Tal curva representa o perfil das correntes descarregadas nos para-raios instalados no sistema de distribuição de energia da concessionária AES Sul. Foram considerados todos os valores das descargas atendendo as polaridades positivas e negativas. A Fig. 6.3 apresenta o perfil das correntes de descarga para intensidades de até 10 kA.

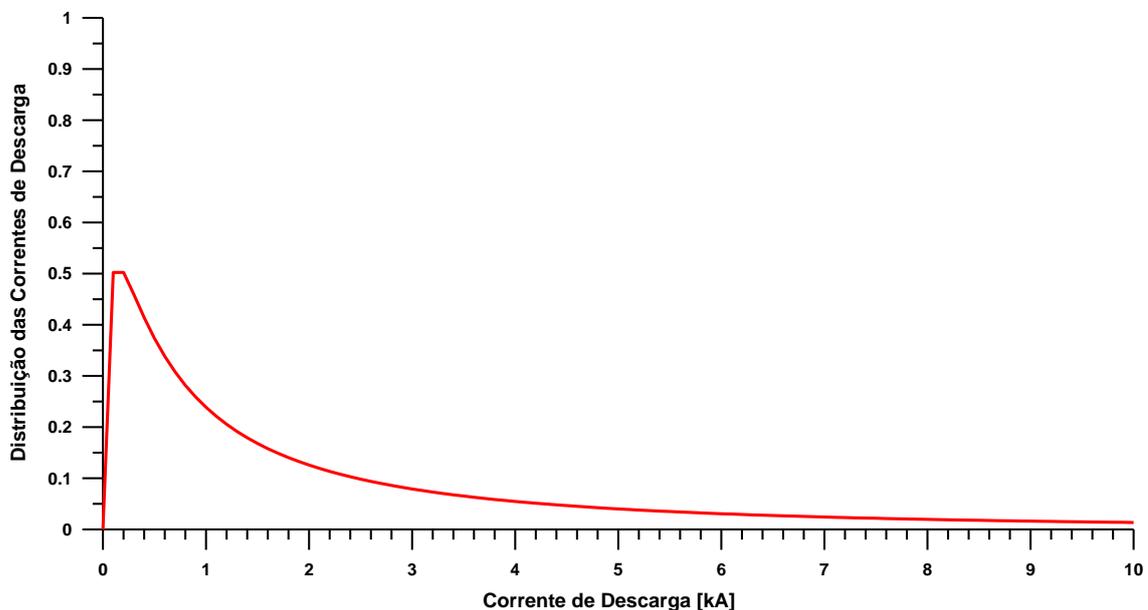


Fig. 6.3 - Curva da função densidade da distribuição log-normal elaborada com base nas amplitudes das correntes descarregadas nos para-raios. Adaptado de [1].

Definido o perfil das correntes de descarga, a próxima etapa para estimar o risco de falha consiste em determinar a suportabilidade dos para-raios e dos desligadores automáticos frente à ocorrência de correntes elevadas. Conforme será discutido no tópico a seguir.

6.2 - Suportabilidade frente à correntes elevadas de curta duração

A característica que o para-raios tem de suportar descargas atmosféricas baseia-se na sua capacidade de dissipar de forma dinâmica e térmica os efeitos da corrente de descarga. Isso, sem causar envelhecimento elevado ou dano no isolamento relativo à sua condição original [13, 39, 40]. Se a energia descarregada é excessiva, os varistores podem furar ou quebrar. Se a tensão residual também for demasiadamente elevada, uma falha dielétrica pode ocorrer. Em todos estes casos, o para-raios comporta-se geralmente como um limitador de curto-circuito, causando o desligamento da rede.

Para determinar a suportabilidade dos para-raios frente a correntes de descarga, são realizados ensaios de *Up-and-Down* [30, 34, 36, 37]. Os ensaios foram realizados em varistores de óxido metálico, desligadores automáticos convencionais e desligadores automáticos eletromecânicos.

O modelo estatístico segundo *Weibull* é amplamente utilizado para análise de suportabilidade de sistemas elétricos, bem como é também usualmente adotado para análise da suportabilidade frente à absorção de energia de varistores de óxido metálico [13]. Dessa forma, o modelo estatístico adotado para a determinação da suportabilidade dos varistores e dos desligadores frente à corrente de descarga é representado pela seguinte função de probabilidade:

$$P(I) = 1 - 0,5 \left(1 + \frac{I - I_{50\%}}{\eta\sigma} \right)^{\frac{1,39}{\ln \frac{\eta}{\eta-1}}}, \quad (6.2)$$

onde:

$P(I)$ - função de distribuição acumulada *Weibull*;

I - corrente de descarga;

$I_{50\%}$ - valor médio da corrente de descarga;

σ - desvio padrão;

η - constante da distribuição de *Weibull* simétrica.

De acordo com a ANSI [16], o para-raios de 5 kA deve suportar dois impulsos de 40 kA ou dois impulsos de 65 kA sem falhar. Em relação ao para-raios de 10 kA a ANSI estabelece dois impulsos de 100 kA sem que haja falha. Esta norma faz uma relação entre a condição de serviço do equipamento e o nível de corrente que este é capaz de suportar. Esta relação é feita da seguinte forma:

- Serviço leve: o para-raios deve suportar dois impulsos de 40 kA na forma 4/10 μ s;
- Serviço normal: o para-raios deve suportar dois impulsos de 65 kA na forma 4/10 μ s;
- Serviço pesado: o para-raios deve suportar dois impulsos de 100 kA na forma 4/10 μ s.

De acordo com a IEC [15], o para-raios de 5 kA deve suportar dois impulsos de 65 kA e o para-raios de 10 kA deve suportar dois impulsos de 100 kA. Entretanto, também é estabelecido que de acordo com a condição de serviço esses níveis de corrente podem ser maiores ou menores. É conveniente lembrar que a IEC também considera que os impulsos devem ser gerados na forma 4/10 μ s.

A Fig. 6.4 apresenta uma curva de probabilidade acumulada da distribuição de *Weibull*. Esta curva foi desenvolvida a partir da Equação 6.2 de acordo com um para-raios de 5 kA operando sob condições de serviço normal. Convém lembrar que se trata de uma curva teórica desenvolvida com base em valores especificados nas normas vigentes [15, 16, 17]. Logo, esta curva indica que o para-raios irá suportar no mínimo dois impulsos de 65 kA na forma 4/10 μ s. O desvio padrão adotado foi de 3,25 kA.

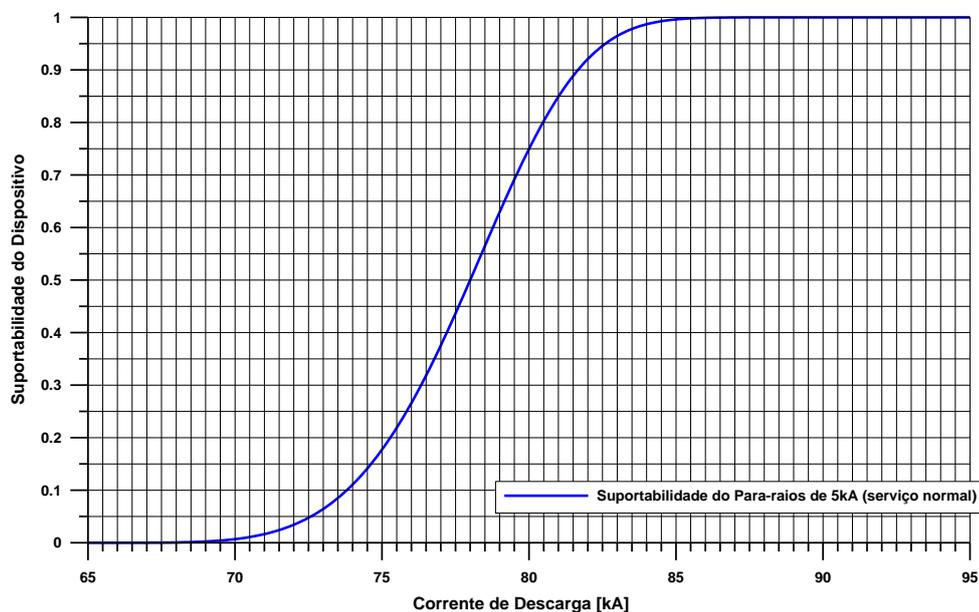


Fig. 6.4 - Curva de probabilidade acumulada relativa à suportabilidade do para-raios de 5 kA - serviço normal.

A escolha do modelo de *Weibull* se justifica porque ele permite trabalhar com o conceito de suportabilidade ou falha absoluta, ou seja, dotado de falha unitária, fato que pode ser confirmado através de resultados de ensaios em laboratório [13].

Não são observadas, em laboratório, falhas na região superior a 4 vezes o desvio padrão, sugerindo a adoção de uma distribuição de probabilidade limitada, como é o caso da distribuição *Weibull*.

A partir do perfil das correntes descarregadas nos para-raios e do modelo estatístico que irá representar a suportabilidade dos varistores e dos desligadores automáticos, torna-se possível estimar o risco de falha [27, 48].

6.3 - Risco de falha

O risco de falha indica a probabilidade do equipamento não ser capaz de dissipar a energia atribuída a surtos atmosféricos ou de manobra. A partir da análise do risco de falha será possível estimar a influência dos desligadores automáticos convencionais e eletromecânicos no desempenho dos para-raios.

A estimativa do risco de falha de um para-raios considera sua probabilidade de falha de acordo com as correntes de descarga. Logo, para determinar o risco de falha é necessário conhecer o perfil estatístico das correntes descarregadas nos para-raios, bem como os limites de suportabilidade desses equipamentos.

O risco de falha é determinado através da área da função gerada através da multiplicação entre as curvas que representam a distribuição estatística das correntes e a suportabilidade de corrente dos para-raios [27, 48], conforme apresentado na equação 6.3.

$$R_{falha} = \int D_{PS}(I) \cdot S_{PR}(I) \cdot dI, \quad (6.3)$$

onde:

R_{falha} - Risco de falha do para-raios;

$D_{PS}(I)$ - Função densidade de probabilidade das correntes descarregadas nos para-raios;

$S_{PR}(I)$ - Função acumulada de probabilidade relacionada à suportabilidade do para-raios.

A equação 6.3 se refere ao princípio geral do método pelo qual o risco de falha do para-raios pode ser estimado. No entanto, torna-se necessário considerar também a contribuição do desligador automático durante o cálculo do risco. Portanto, através da equação 6.4 é possível determinar o risco de falha do para-raios considerando também a contribuição do desligador automático.

$$R'_{falha} = \int D_{PS}(I) \cdot \{1 - [(1 - S_{PR}(I))(1 - S_{DA}(I))]\} \cdot dI, \quad (6.4)$$

onde:

R'_{falha} - Risco de falha do para-raios associado ao desligador automático;

$D_{PS}(I)$ - Função densidade de probabilidade das correntes descarregadas nos dispositivos;

$S_{PR}(I)$ - Função acumulada de probabilidade relacionada à suportabilidade do para-raios;

$S_{DA}(I)$ - Função acumulada de probabilidade relacionada à suportabilidade do desligador automático.

Os tópicos subsequentes discorrem sobre a determinação da estimativa do risco de falha dos para-raios onde, inicialmente, será determinado o risco de falha teórico. Esse tópico irá associar o risco de falha ao perfil das correntes descarregadas nos para-raios e a suportabilidade desses equipamentos, com base nos valores estabelecidos nas normas vigentes e literaturas técnicas. O objetivo é estimar o risco de falha considerando suportabilidades ideais.

Em seguida, serão analisados os riscos considerando o perfil das correntes de descarga e a suportabilidade dos para-raios. Dessa forma é possível obter resultados que não envolvam a influência do desempenho do desligador automático. Todavia, convém informar que, devido a limitações técnicas do gerador de impulso de corrente utilizado, a suportabilidade dos para-raios foi determinada a partir de varistores de óxido metálico.

Posteriormente, será determinado o risco de falha considerando o perfil das correntes descarregadas nos para-raios, a suportabilidade dos para-raios e a suportabilidade dos desligadores automáticos convencionais. Neste caso, o objetivo é verificar a influência do desligador automático convencional no desempenho dos para-raios.

Por último, será determinado o risco de falha do para-raios associado ao desligador eletromecânico. Para isso, foram considerados o perfil das correntes descarregadas nos para-raios, a suportabilidade dos para-raios e a suportabilidade dos desligadores automáticos eletromecânicos.

6.3.1 - Risco de falha 1

A partir das Equações 6.3 e 6.4 foram determinados os riscos de falha envolvendo dois tipos de varistores de óxido metálico, dois projetos de desligadores convencionais pertencentes a fabricantes distintos e três projetos de desligadores eletromecânicos considerando as condições de serviço leve, normal e pesada.

Com o propósito de obter valores de referência, inicialmente foram determinados riscos de falha considerando valores teóricos de suportabilidade, ou seja, valores específicos contidos nas normas vigentes e literaturas técnicas. Contudo, a curva de distribuição das correntes descarregadas nos para-raios foi desenvolvida com base em valores reais.

As Fig.s 6.5, 6.6 e 6.7 ilustram o comportamento da curva do risco de falha considerando para-raios relativos às três classificações de serviço.

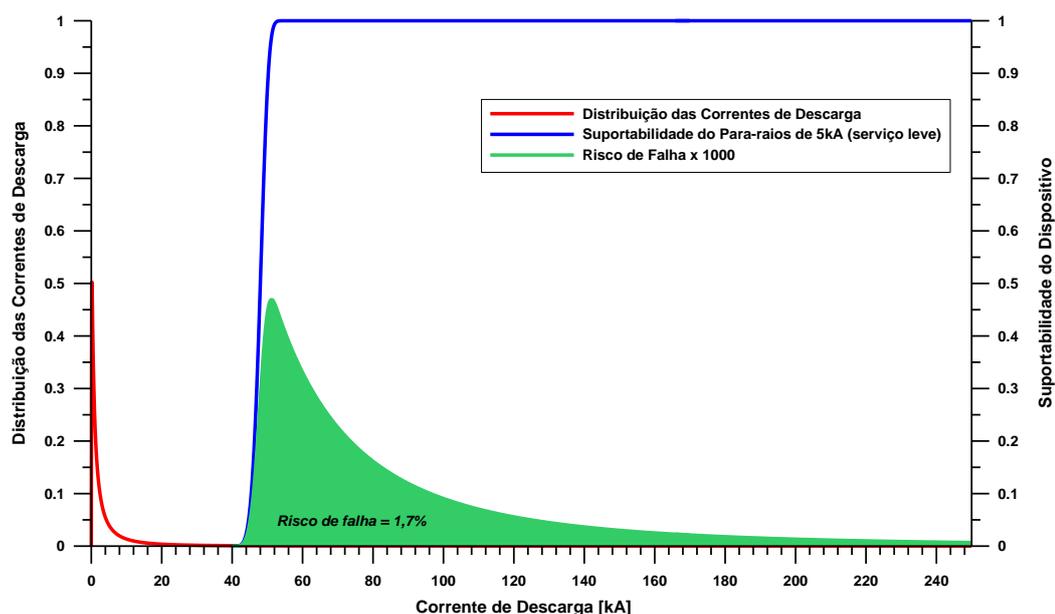


Fig. 6.5 - Risco de falha de um para-raios de 5 kA - serviço leve.

Da Fig. 6.5 é possível quantificar o risco de falha teórico de um para-raios de 5 kA, desenvolvido para operar submetido à condição de serviço leve, através da área sob a curva do risco de falha. A curva de suportabilidade foi elaborada considerando o valor médio igual a 48 kA e o desvio padrão igual a 2 kA. Nota-se que o risco de falha obtido foi de 1,7%.

A Fig. 6.6 exhibe o comportamento da curva que representa o risco de falha previsto para um para-raios de 5 kA projetado para operar sob condições de serviço normal. Observa-se uma redução no valor do risco de falha em relação ao risco obtido na condição de serviço leve. Isso já era esperado, visto que uma mudança nos níveis da suportabilidade translada a curva $S_{PR}(I)$ ao longo do eixo I, com a consequente modificação na área da curva que representa o risco de falha (R_{falha}) para uma determinada distribuição das correntes descarregadas nos para-raios. Deslocar a curva $S_{PR}(I)$ para a direita equivale a elevar a suportabilidade do para-raios, resultando na redução do risco de falha.

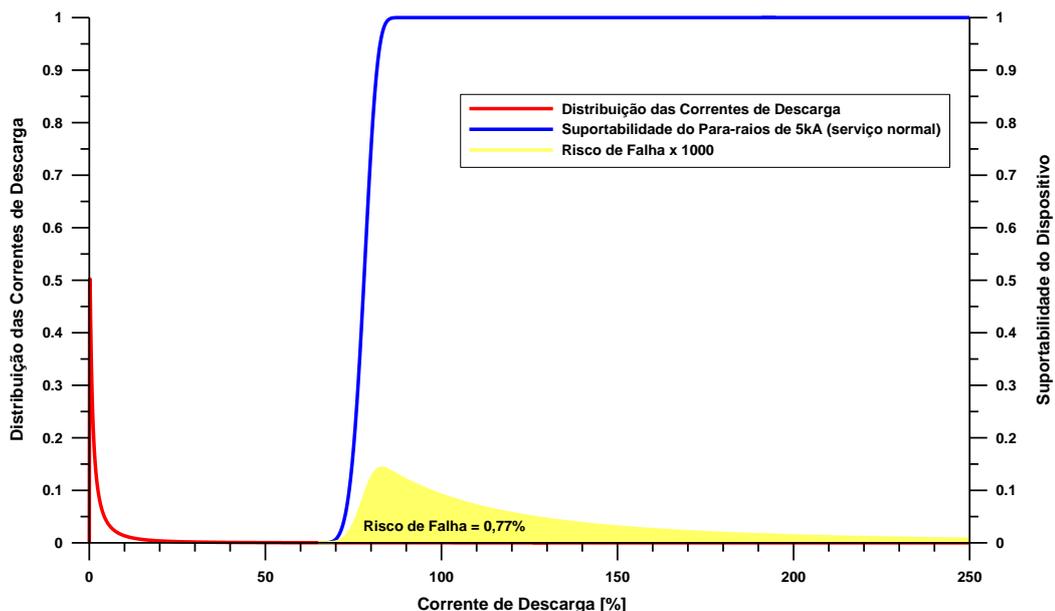


Fig. 6.6 - Risco de falha de um para-raios de 5 kA - serviço normal.

A curva de suportabilidade foi elaborada considerando o valor médio igual a 78 kA e o desvio padrão igual a 3,25 kA. O risco de falha obtido foi de 0,77%.

Por fim, foi determinado o risco de falha referente a um para-raios capaz de operar sob condições de serviço pesado, conforme ilustra a Fig. 6.7.

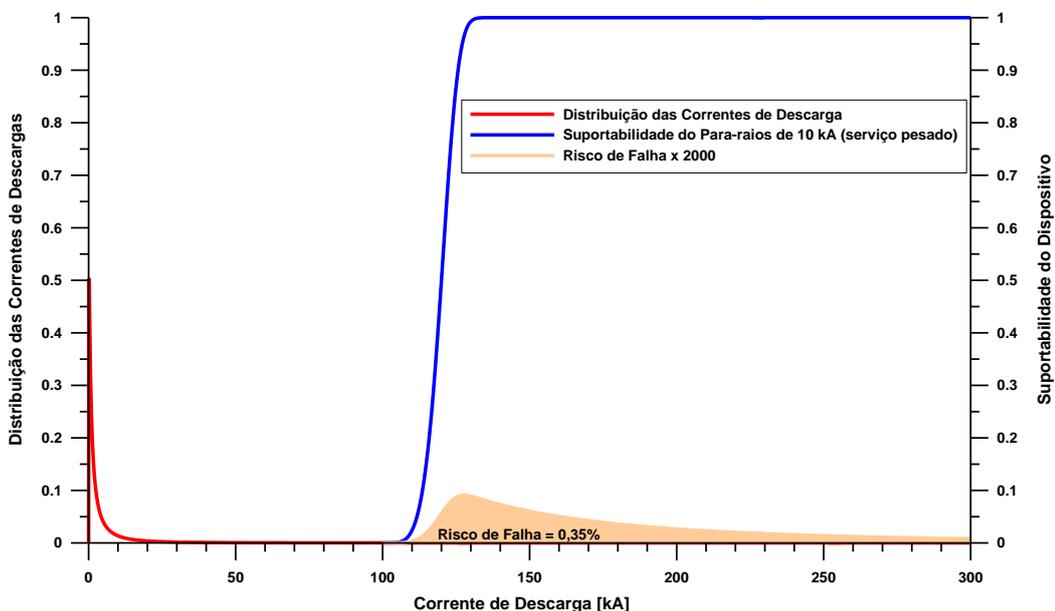


Fig. 6.7 - Risco de falha de um para-raios de 10 kA - serviço pesado.

O valor do risco de falha determinado foi de 0,35%. A curva de suportabilidade foi desenvolvida considerando o valor médio igual a 120 kA e o desvio padrão igual a 5 kA. A Tabela 6.1 apresenta o resumo dos resultados obtidos das Fig.s 6.5, 6.6 e 6.7.

Tabela 6.1 - Valores de referência do risco de falha.

Dispositivo	Risco de Falha (%)
Para-raios de 5 kA (suportabilidade de 40 kA)	1,7
Para-raios de 5 kA (suportabilidade de 65 kA)	0,77
Para-raios de 10 kA (suportabilidade de 100 kA)	0,35

De acordo com o perfil das correntes descarregadas nos para-raios (ver Fig. 6.3), a probabilidade para a ocorrência de correntes superiores a 40 kA é de aproximadamente 2,2 %. Diante disso, observa-se que o risco de falha acima de 40 kA é relativamente pequeno. Logo, atesta-se que as falhas em para-raios de distribuição deveriam ser eventos raros. No entanto, essa afirmativa diverge em relação ao número elevado de para-raios retirados do sistema de distribuição por motivo de falha [23, 26, 27, 28, 41]. Dessa forma, resultados mais precisos somente serão obtidos quando a característica de suportabilidade dos dispositivos for determinada a partir de resultados de ensaios.

6.3.2 - Risco de falha 2

Após a obtenção dos valores de referência dos riscos de falha dos para-raios, o que será tratado no presente tópico abrange a determinação do risco considerando a suportabilidade do para-raios a partir de resultados de ensaios. Contudo, não será considerada a presença do desligador automático, visto que neste momento não se deseja obter resultados que envolvam a influência deste dispositivo.

A suportabilidade dos para-raios frente à correntes de descarga foi determinada a partir de ensaios de “*Up-and-Down*”. Os ensaios foram realizados em dois diferentes conjuntos de varistores de óxido metálico, V_1 e V_2 .

A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos ensaios. Os valores críticos foram determinados considerando quatro desvios padrão (4σ), uma vez que não foram observadas falhas em laboratório a medida que foi considerada a constante de distribuição de *Weibull* simétrica igual a 4.

Tabela 6.2 - Resultado do ensaio de “Up-and-Down” realizado em varistores de óxido metálico.

Dispositivo	Corrente [kA]			
	Corrente Mínima [I_{\min}]	Corrente Média [$I_{50\%}$]	Corrente Máxima [I_{\max}]	Desvio Padrão [σ]
V ₁	67	107	147	10
V ₂	60	100	140	10

Devido a limitações do gerador de impulso de corrente, os ensaios de suportabilidade foram realizados apenas em varistores de óxido metálico. No entanto, quando montados em um para-raios, os varistores aumentam a sua capacidade de suportabilidade externa, resistindo níveis mais elevados de corrente.

O rompimento da isolamento externa do varistor é causado pela corrente que gera a tensão residual, conforme apresentado na Fig. 6.8.



Fig. 6.8 - Varistor com o isolamento externo danificado após a aplicação do impulso de corrente.

Em relação ao conjunto de varistores V₁, a Fig. 6.9 exhibe o comportamento das curvas necessárias para a obtenção do risco de falha, bem como o seu respectivo valor.

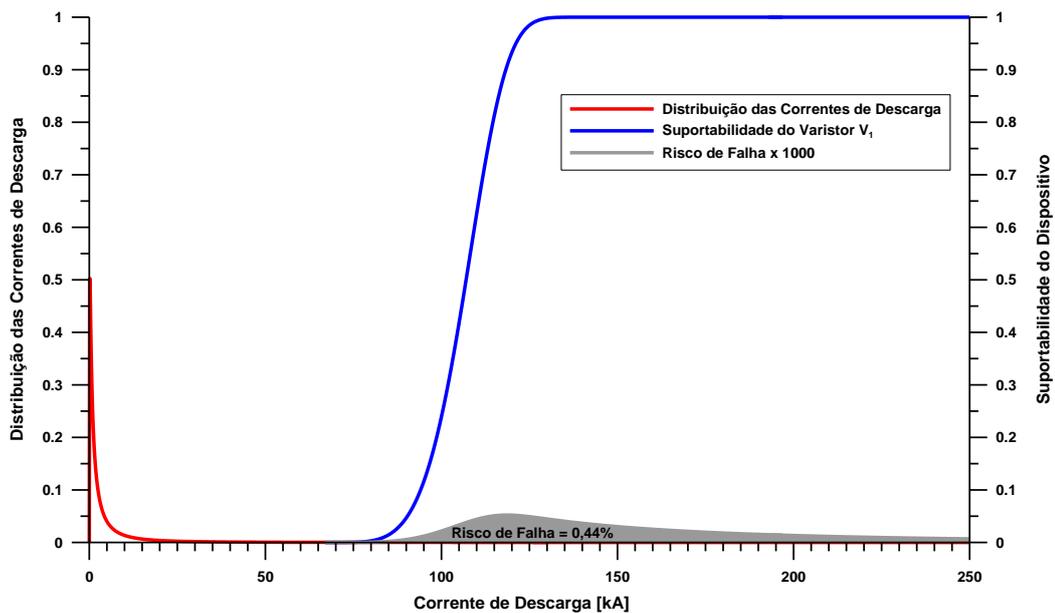


Fig. 6.9 - Risco de falha relativo ao varistor V₁.

Nota-se que o risco de falha relativo a este conjunto de varistores foi de 0,44%. A partir do resultado do ensaio de *Up-and-Down* é possível afirmar que esse varistor apresenta características típicas de um para-raios que opera em condições de serviço normal. Porém, o risco de falha considerando um para-raios ideal classificado com essa categoria apresentou resultado igual a 0,77%. Posto isto, como pode um dispositivo considerado ideal apresentar um risco de falha superior a um não ideal? A resposta para esta pergunta pode ser obtida a partir das curvas de suportabilidade apresentadas na Fig. 6.10.

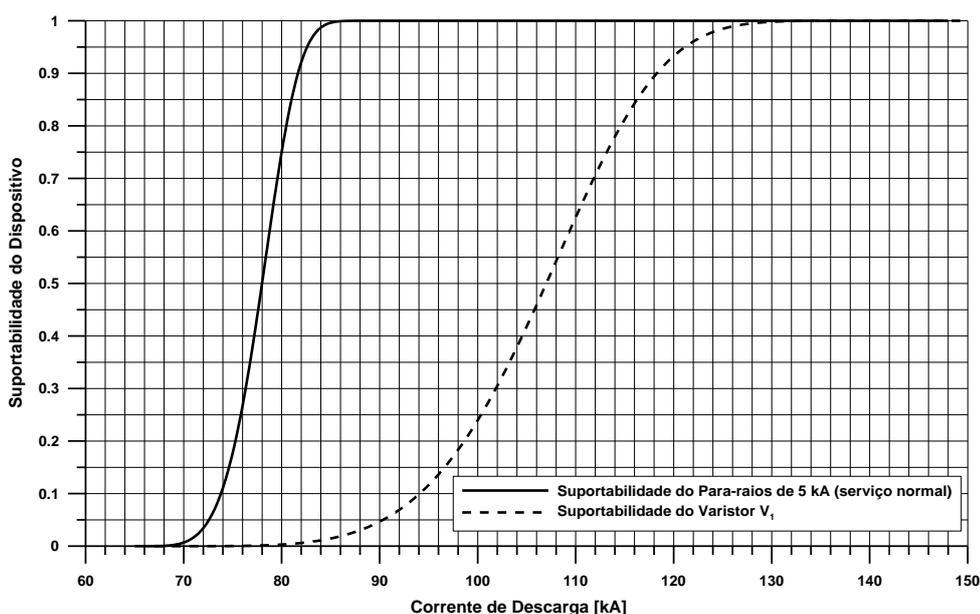
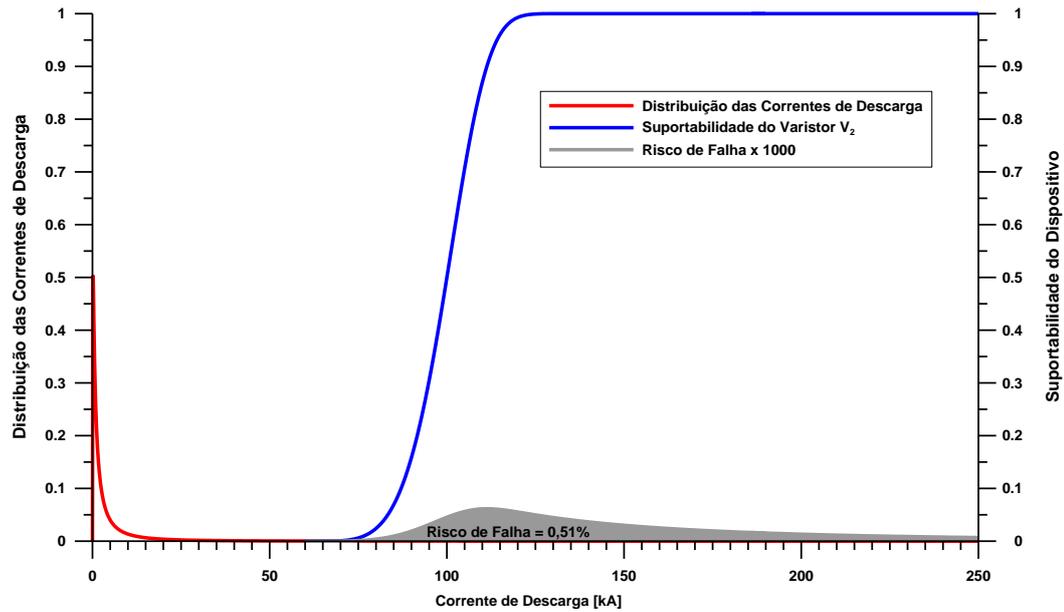


Fig. 6.10 - Suportabilidade do Para-raios de 5 kA versus Suportabilidade do Varistor V₁

À medida que o dispositivo suporta níveis de corrente mais elevados, o risco de falha reduz. Porém, isso ocorre apenas quando os dispositivos estão submetidos a mesma distribuição das correntes de descarga.

Uma vez que a maior concentração dos níveis das correntes descarregadas nos para-raios está localizada em torno de 1,72 kA, fica evidente que quanto maior a suportabilidade do dispositivo, menor será a probabilidade de ocorrência de descargas com amplitudes elevadas. Em virtude disso, o risco de falha é reduzido. Tal comportamento é observado na Fig. 6.10, onde o varistor V₁ apresentou uma suportabilidade frente à descargas atmosféricas superior a do para-raios resultando em um risco de falha menor.

Isto também é observado quando se considera o varistor V₂, Fig. 6.11. Porém, o risco de falha é superior ao do varistor V₁, uma vez que ele apresenta valor crítico inferior de corrente igual a 60 kA. Já em relação ao varistor V₁, com base na mesma corrente, obteve-se uma intensidade igual a 67 kA.

Fig. 6.11 - Risco de falha relativo ao varistor V_2

6.3.3 - Risco de falha 3

Este tópico discorre sobre o desempenho do para-raios considerando a influência do desligador automático convencional. Além dos varistores V_1 e V_2 , também serão analisados, considerando fabricantes distintos, dois projetos de desligadores convencionais, DC_1 e DC_2 .

Em virtude do tipo de ligação entre o para-raios e o desligador automático, ao que se refere à suportabilidade, espera-se que o dispositivo que apresentar menor suportabilidade à corrente de descarga será o responsável pela falha do conjunto (para-raios associado ao desligador automático) como um todo.

A Fig. 6.12 exhibe as curvas que representam as suportabilidades do varistor V_1 e do desligador DC_1 .

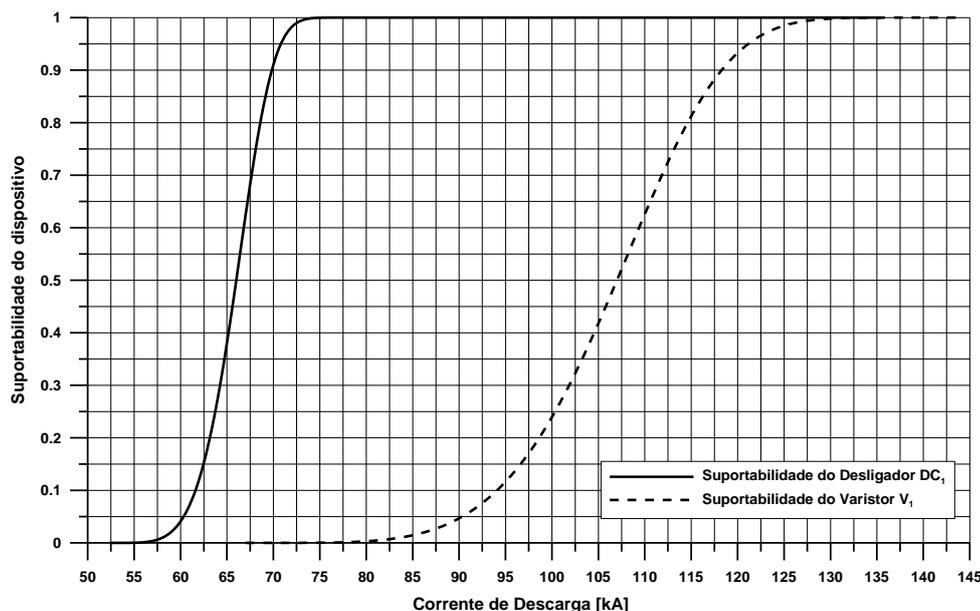


Fig. 6.12 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DC_1

É notório que o desligador automático irá comprometer a adequada operação do para-raios – fazendo ele ser retirado de campo antecipadamente. Isso pode ser confirmado através do valor do risco de falha do varistor associado ao desligador, conforme apresenta a Fig. 6.13.

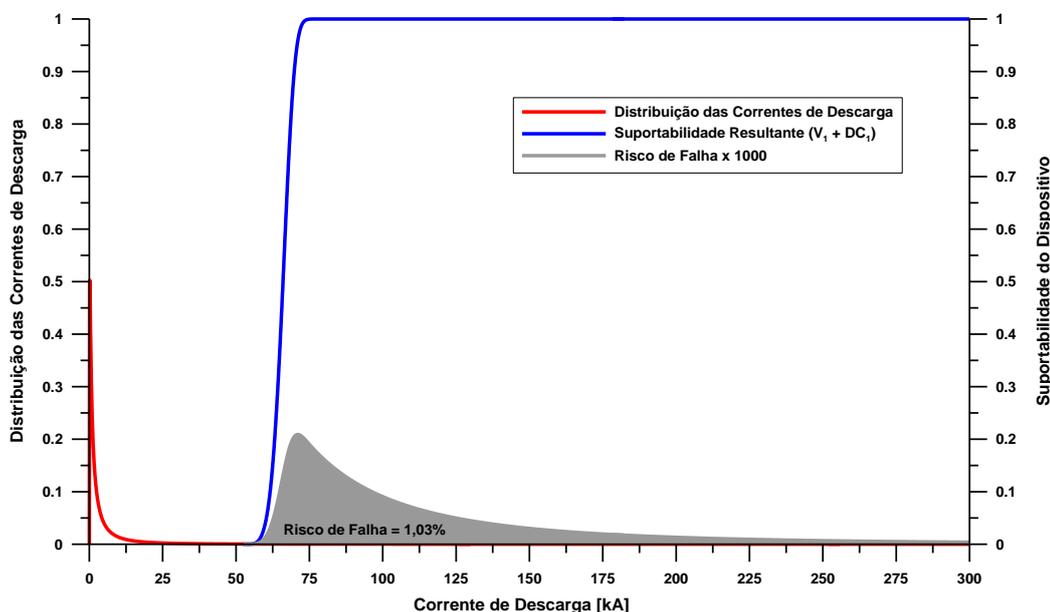


Fig. 6.13 - Risco de falha do varistor V_1 associado ao desligador DC_1

O risco de falha determinado foi igual a 1,03%. Convém lembrar que o risco de falha desconsiderando a influência do desligador automático foi de 0,44%. Dessa forma, fica evidente o quanto o desligador automático DC_1 comprometeu o desempenho do varistor V_1 , elevando o risco em 134 %. Esse é mais um indício que corrobora as questões discutidas no capítulo 4 sobre as falhas atribuídas aos desligadores convencionais.

Referindo-se ao desempenho do varistor V_2 quando associado ao desligador DC_1 , observa-se na Fig. 6.14 que o desligador novamente irá comprometer o rendimento do para-raios, sendo, a princípio, o responsável pela sua retirada de campo ainda em boas condições operacionais.

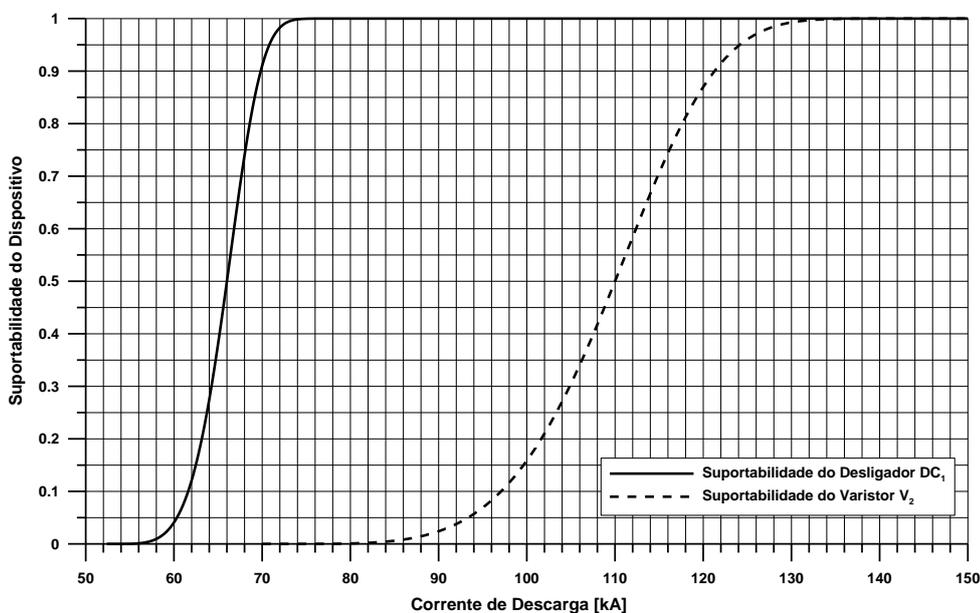


Fig. 6.14 - Suportabilidade do Varistor V_2 versus Suportabilidade do Desligador DC_1

A partir do risco de falha será possível quantificar os possíveis danos causados pelo desligador automático ao varistor V_2 . Na Fig. 6.15 estão apresentadas as curvas que envolvem o risco de falha referente ao varistor V_2 associado ao desligador DC_1 , bem como o seu respectivo valor.

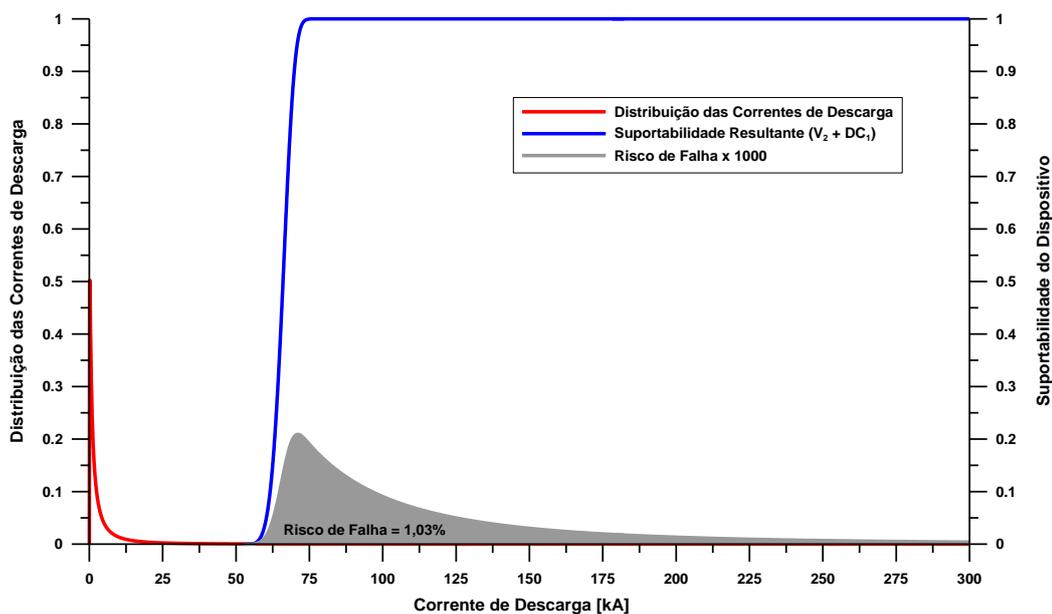


Fig. 6.15 - Risco de falha do varistor V_2 associado ao desligador DC_1

Nota-se que mesmo apresentando menor suportabilidade à corrente de descarga, quando comparado ao varistor V_1 , o risco de falha obtido mais uma vez foi igual a 1,03%. Contudo, ao que compete ao varistor V_2 , esse resultado equivale a 102% no aumento do risco desse dispositivo ser retirado de campo em boas condições devido à influência do desligador automático. Tal resultado é mais um indicativo da falha existente no projeto do desligador DC_1 .

Procurando obter mais informações relativas ao desempenho do desligador convencional, o segundo projeto foi analisado. O conjunto é composto por 30 unidades de desligadores convencionais desenvolvidas por um fabricante distinto do desligador DC_1 .

Denominadas de DC_2 , as amostras também foram submetidas ao ensaio de “*Up-and-Down*” e o seu desempenho foi confrontado com os desempenhos dos varistores V_1 e V_2 .

Inicialmente as suportabilidades de V_1 e DC_2 foram confrontadas, conforme ilustra a Fig. 6.16.

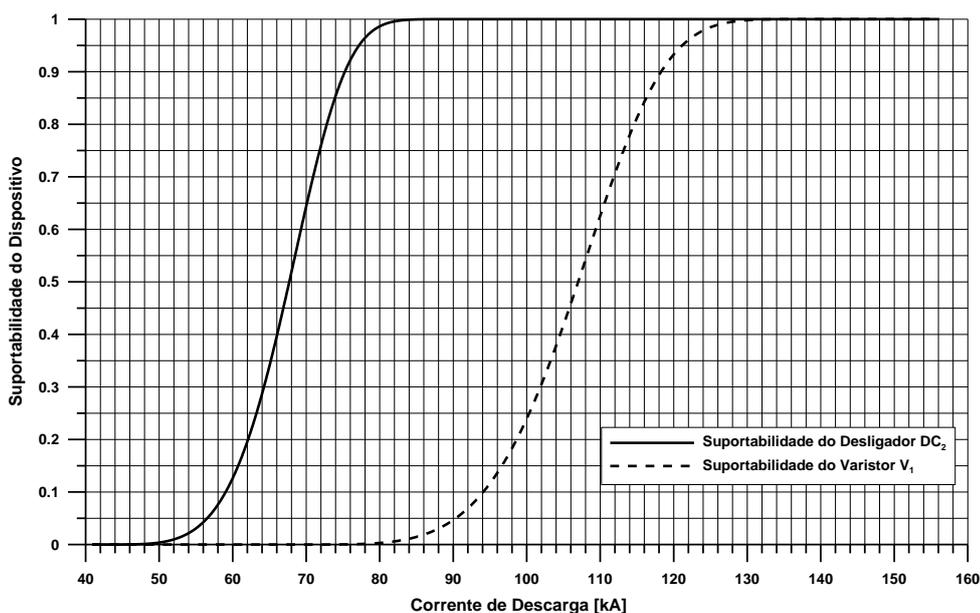


Fig. 6.16 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DC_2

A partir do ensaio de “*Up-and-Down*” realizado nos desligadores DC_2 foram obtidos um valor médio de corrente disruptiva de 67,7 kA, bem como um valor crítico inferior igual a 40,9 kA. Desse modo, possivelmente o desligador será novamente o responsável pela retirada de campo do para-raios ainda em boas condições operacionais, isto é, o desligador está limitando a operação do para-raios entre 40,9 kA e 94,5 kA.

Os danos causados ao desempenho do varistor V_1 foram estimados através da determinação do risco de falha apresentado na Fig. 6.17. Nota-se que a operação do

desligador DC₂ associado ao varistor V₁ gerou um aumento de aproximadamente 127 % do para-raios ser retirado de campo prematuramente.

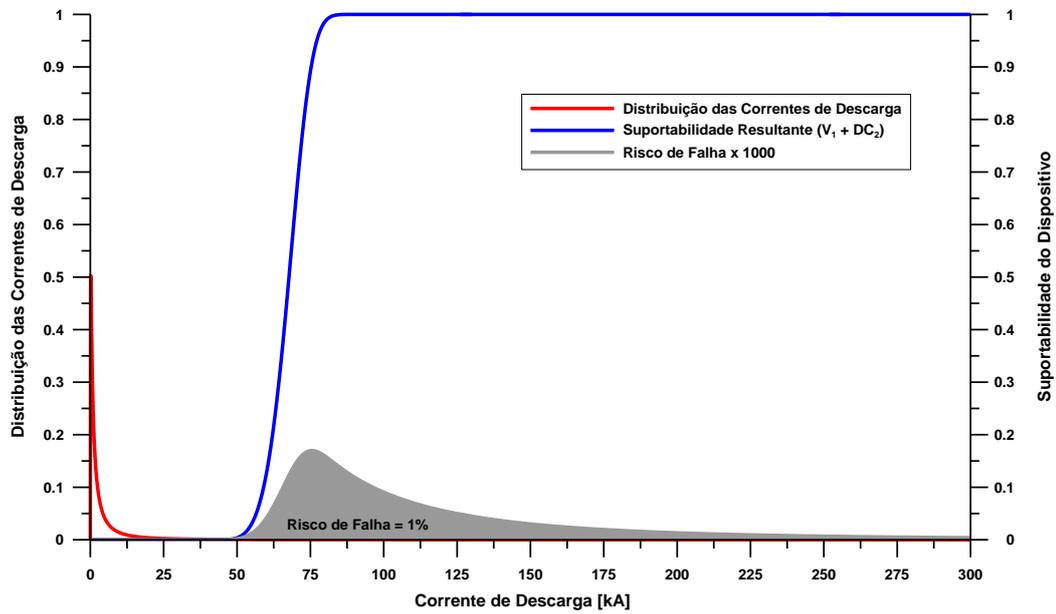


Fig. 6.17 - Risco de falha do varistor V₁ associado ao desligador DC₂

O comportamento do desligador DC₂ frente a correntes elevadas de curta duração também foi confrontado com o comportamento do varistor V₂. A Fig. 6.18 apresenta as curvas de suporteabilidade desses dispositivos, bem como ilustra a curva de suporteabilidade resultante.

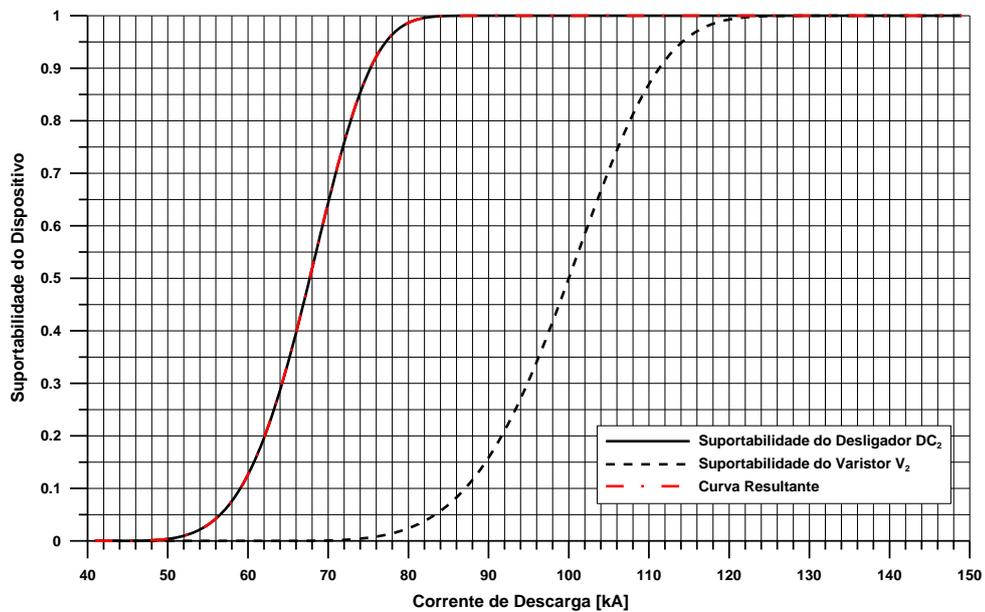


Fig. 6.18 - Suporteabilidade do Varistor V₂ versus Suporteabilidade do Desligador DC₂

Nota-se que a curva resultante reflete o mesmo desempenho da curva relativa ao desligador DC₂. Isso corrobora com a tese de que novamente o desligador será o responsável pela retirada de campo do para-raios. Porém, para quantificar a influência do desligador sobre a retirada do para-raios é preciso conhecer o risco de falha.

A Fig. 6.19 apresenta o risco de falha do desligador DC₂ quando associado ao varistor V₂. O risco de falha obtido foi de 1%.

Esse resultado permite afirmar que o desligador DC₂ operando junto ao para-raios desenvolvido com o varistor V₂ eleva a probabilidade da retirada do para-raios em boas condições operacionais em 96%.

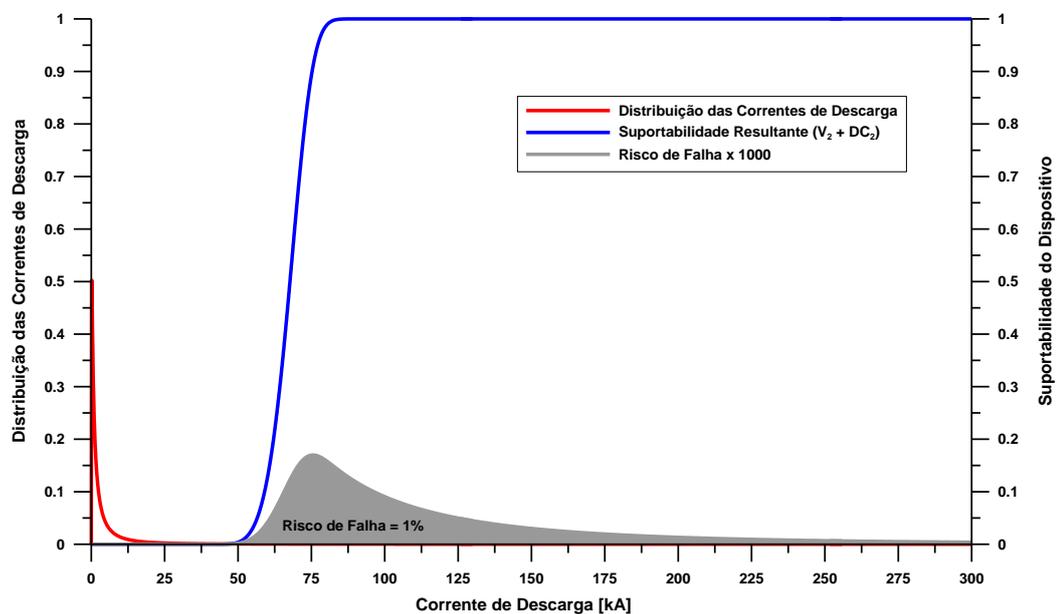


Fig. 6.19 - Risco de falha do varistor V₂ associado ao desligador DC₂

6.3.4 - Risco de falha 4

A partir do risco de falha 3 foi possível observar a influência de dois projetos de desligadores convencionais sobre o desempenho dos para-raios. Neste tópico, o objeto de estudo será o desligador eletromecânico. Onde serão analisados três projetos de acordo com as seguintes condições de serviço:

- Desligador automático eletromecânico projetado para operar submetido à condição de serviço leve (DE₁);
- Desligador automático eletromecânico projetado para operar submetido à condição de serviço normal (DE₂);
- Desligador automático eletromecânico projetado para operar submetido à condição de serviço pesado (DE₃).

Inicialmente, foi verificado o desempenho do varistor V_1 quando associado ao desligador DE_1 , conforme apresentado na Fig. 6.20.

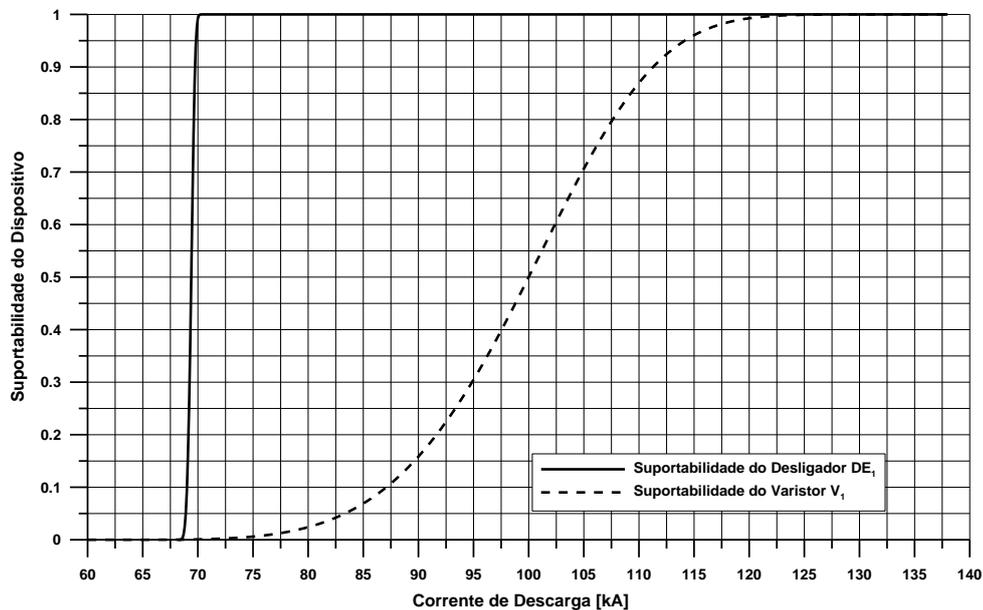
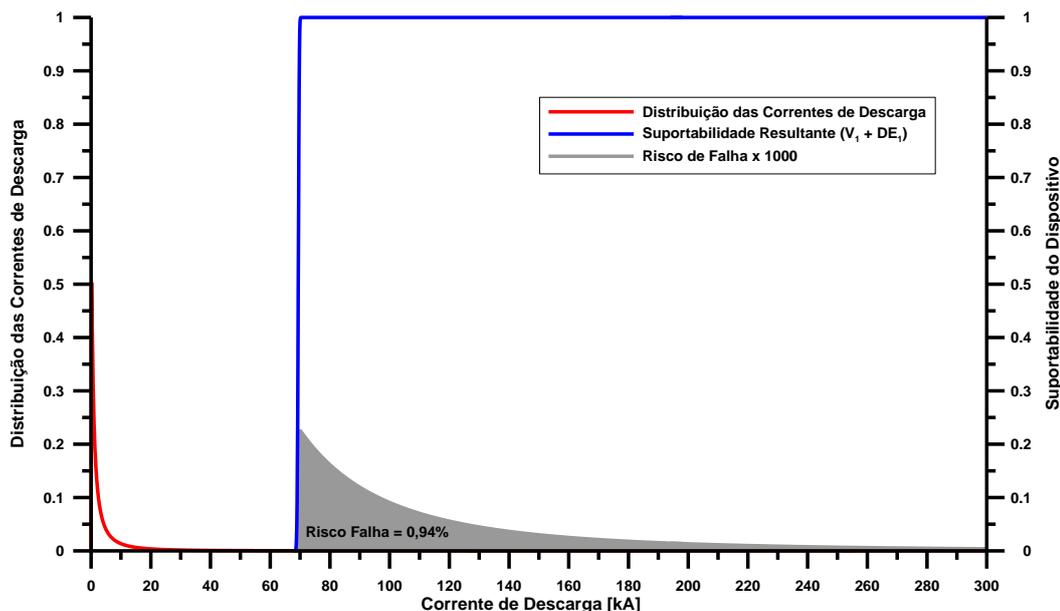


Fig. 6.20 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DE_1

Da Fig. 6.20, nota-se que o desligador será provavelmente o responsável pela retirada do para-raios de operação. Todavia, convém lembrar que o desligador DE_1 foi desenvolvido para operar sob condições de serviço leve. Ou seja, apresenta características operacionais equivalentes a um para-raios de 5 kA devendo suportar no mínimo dois impulsos de 40 kA na forma 4/10 μ s. Já o varistor V_1 apresenta características relativas à condição de serviço normal. Isso, considerando quatro desvios padrão. Logo, espera-se que o risco de falha relativo a esta configuração seja superior ao que compreende apenas o varistor V_1 .

O risco de falha obtido foi de 0,94%, conforme apresentado na Fig. 6.21, elevando a possibilidade de o para-raios ser retirado de campo em boas condições de operação em aproximadamente 114%. Resultado semelhante também foi obtido ao associar o desligador DE_1 ao varistor V_2 .

Fig. 6.21 - Risco de falha do varistor V_1 associado ao desligador DE_1

Um resultado mais adequado foi obtido ao comparar o desligador DE_1 a um para-raios de serviço leve, 5 kA.

A corrente mínima atribuída à suporteabilidade do para-raios foi de 40 kA com base nas normas vigentes. Adotando o desvio padrão (σ) igual a 5% do valor médio da corrente disruptiva, tem-se: $I_{\min} = 40$ kA, $I_{50\%} = 50$ kA e $I_{\max} = 60$ kA.

Para essa nova configuração o risco de falha foi de 1,6%, aproximando-se do risco relativo ao para-raios ideal de 5 kA. Assim, fica evidente que o desligador DE_1 deve ser associado a um para-raios que apresente características da condição de serviço leve.

Em seguida, foi observado o desempenho do varistor V_1 quando associado ao desligador DE_2 . A Fig. 6.22 apresenta o comportamento dos dois dispositivos frente às correntes de descarga. Nota-se que até 103 kA a suporteabilidade do varistor é inferior à suporteabilidade do desligador automático. Esse resultado já era esperado, uma vez que os dois dispositivos apresentam características elétricas semelhantes.

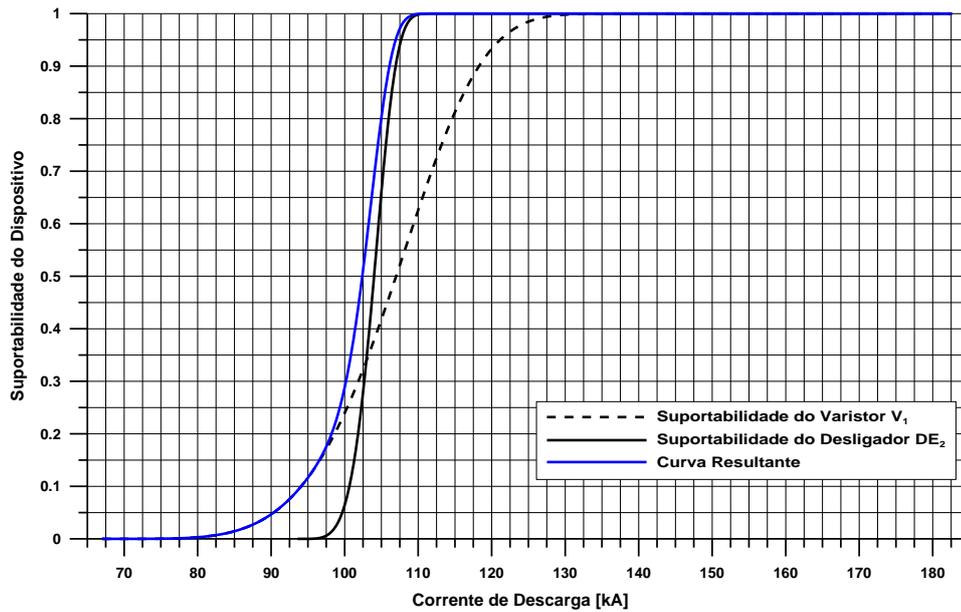


Fig. 6.22 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DE_2

O risco de falha relativo a esta configuração envolve a curva resultante gerada a partir das suportabilidades dos dois dispositivos, conforme ilustra a Fig. 6.23.

Foi obtido um risco de 0,48% resultando em um aumento de 9,1% na probabilidade do para-raios ser retirado de campo ainda em boas condições operacionais. Número satisfatório quando comparado com o desempenho do varistor V_1 associado aos desligadores convencionais.

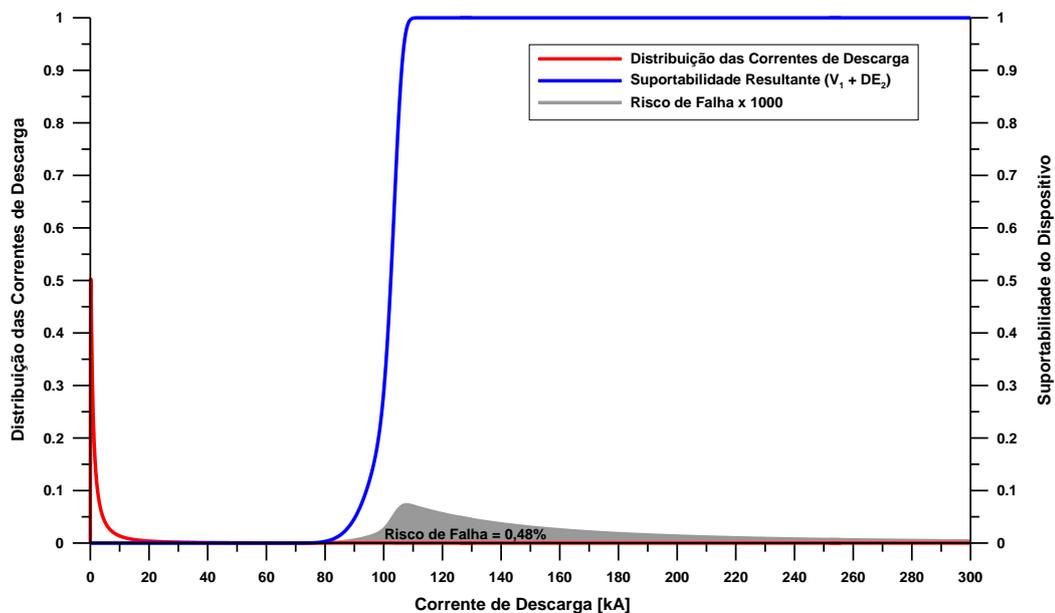


Fig. 6.23 - Risco de falha do varistor V_1 associado ao desligador DE_2

Uma menor influência do desligador no desempenho do varistor foi obtida ao associar o desligador DE_2 ao varistor V_2 . A Fig. 6.24 mostra as curvas de suportabilidade dos dois dispositivos.

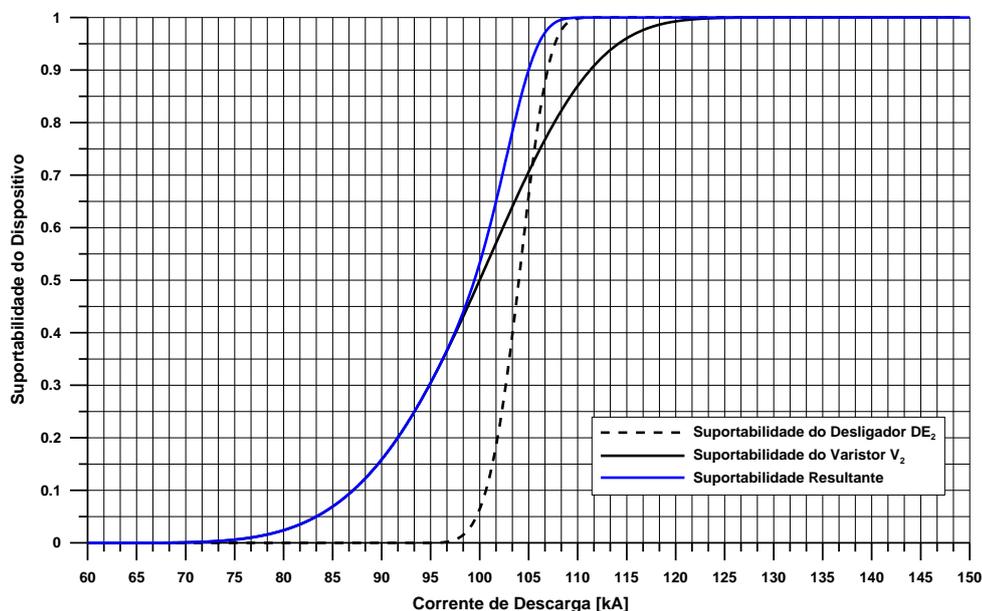


Fig. 6.24 - Suportabilidade do Varistor V_2 versus Suportabilidade do Desligador DE_2

Da Fig. 6.24 nota-se que a partir de 98 kA a curva resultante reduz a suportabilidade à passagem de corrente. Contudo, no que se refere à falha do dispositivo (ver Fig. 6.25), o resultado foi de 0,52%, indicando que o risco de falha do varistor V_2 apenas elevou-se em aproximadamente 2% ao ser associado ao desligador DE_2 .

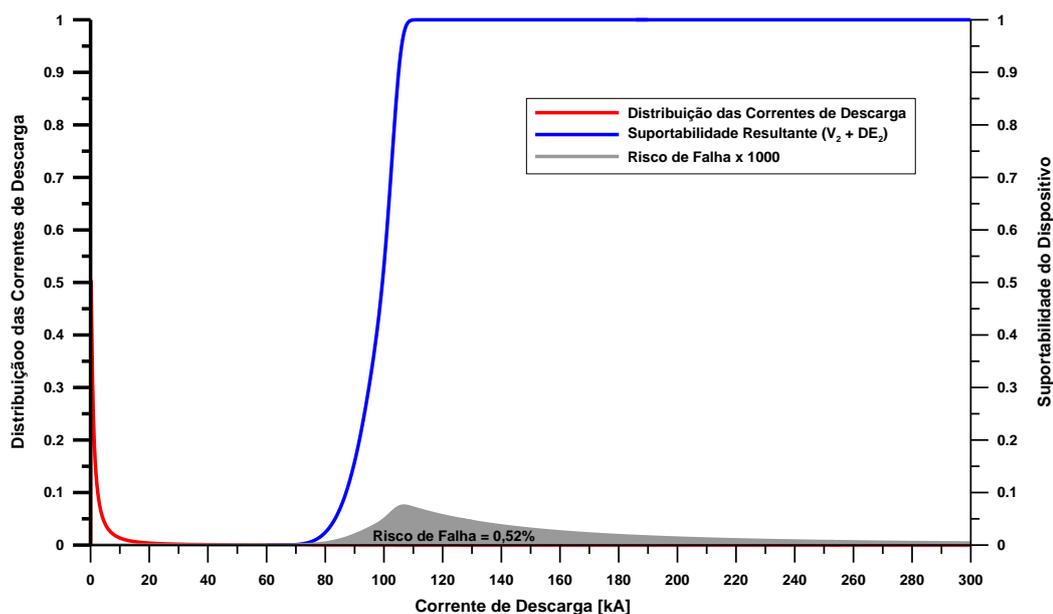


Fig. 6.25 - Risco de falha do varistor V_2 associado ao desligador DE_2

Por fim, foi analisada a influência do desligador DE_3 no desempenho dos varistores V_1 e V_2 . Inicialmente, observou-se o comportamento do desligador DE_3 ligado ao varistor V_1 frente à correntes de descarga, conforme ilustra a Fig. 6.26.

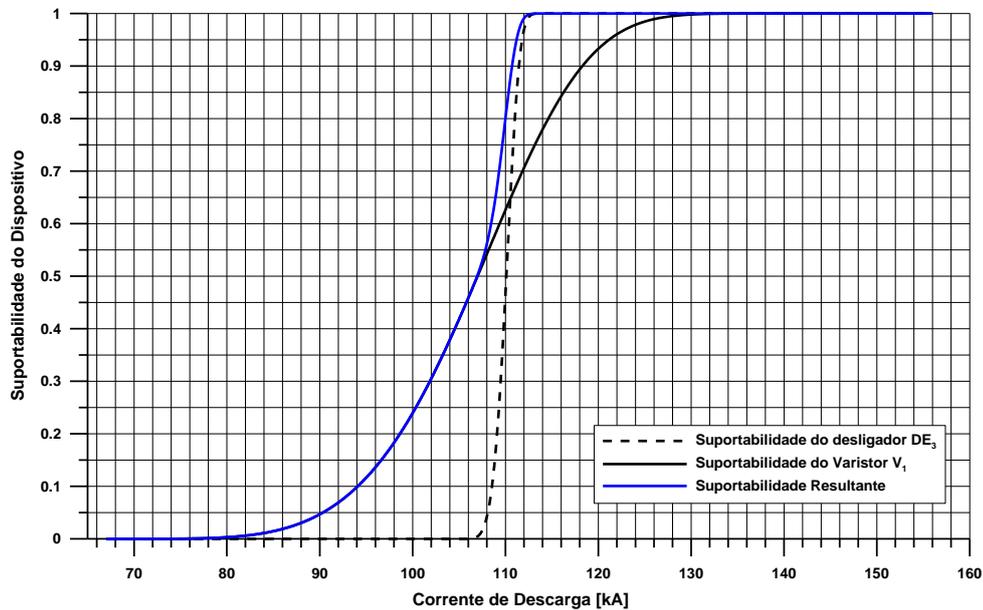


Fig. 6.26 - Suportabilidade do Varistor V_1 versus Suportabilidade do Desligador DE_3

Nota-se que até 107 kA a curva resultante se comporta semelhante a suportabilidade do varistor V_1 . Em seguida ela sofre influência da curva relativa ao desligador DE_3 elevando abruptamente a probabilidade de atuação do desligador, ou falha do varistor, para pequenos acréscimos no nível da corrente de descarga.

Em relação ao risco de falha, a Fig. 6.27 apresenta as curvas relativas, bem como o seu respectivo valor. Verifica-se que a influência do desligador DE_3 sobre o desempenho do varistor V_1 novamente foi bem discreta, alcançando um valor de apenas 4,5%.

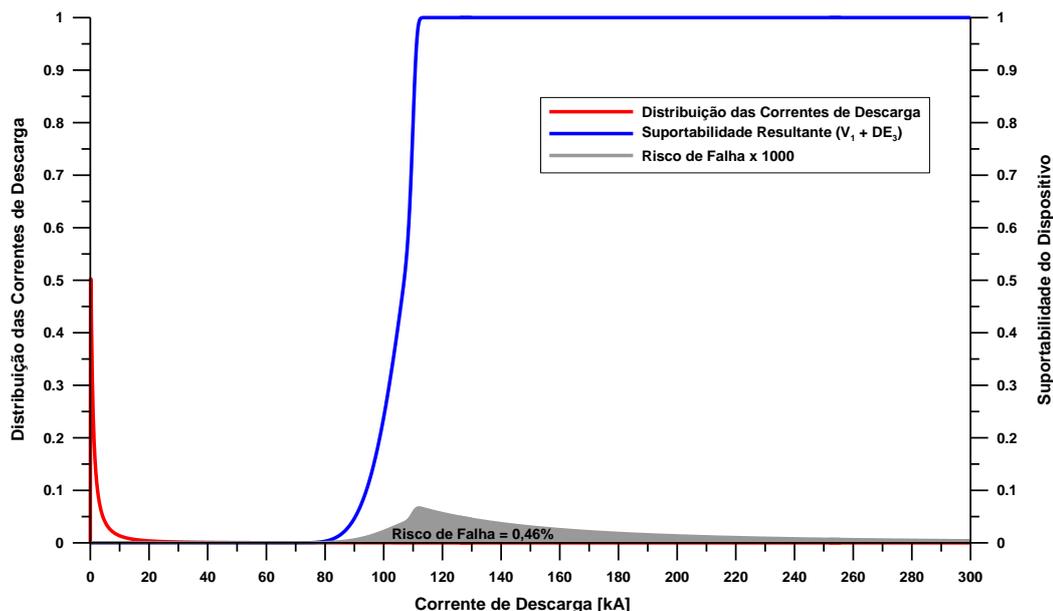


Fig. 6.27 - Risco de falha do varistor V_1 associado ao desligador DE_3

O desempenho do varistor V_2 , quando associado ao desligador DE_3 , está apresentado na Fig. 6.28. Onde são ilustradas as curvas de suportabilidade dos dispositivos, além da curva resultante. Verifica-se que há influência do desligador para valores acima de 108 kA, reduzindo a suportabilidade do conjunto através da atuação do desligador ou falha do varistor.

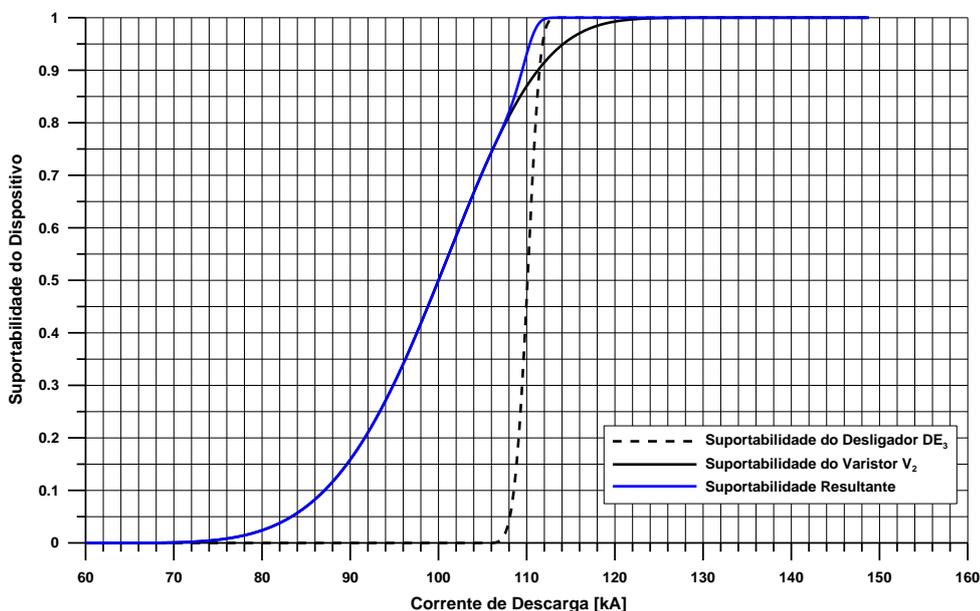


Fig. 6.28 - Suportabilidade do Varistor V_2 versus Suportabilidade do Desligador DE_3

Através do risco de falha foi estimada uma possível influência do desligador DE_3 sobre o desempenho do varistor V_2 . No entanto, os resultados mostraram que o desempenho do varistor não foi alterado quando o mesmo foi associado ao desligador DE_3 , conforme apresentado na Fig. 6.29.

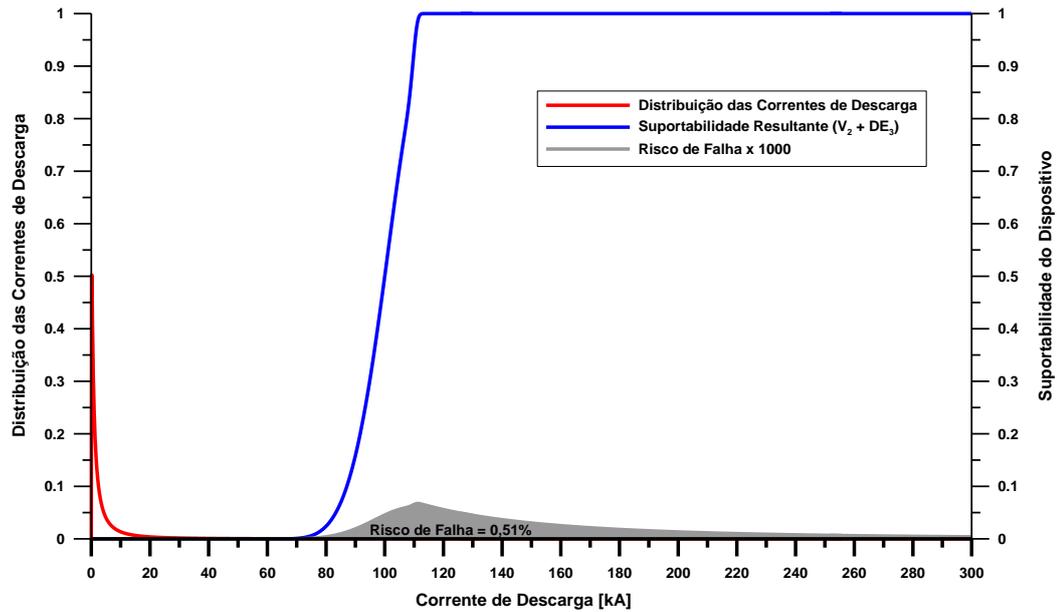


Fig. 6.29 - Risco de falha do varistor V_2 associado ao desligador DE_3

As Figs. 6.30 e 6.31 apresentam os riscos de falha relativos aos varistores, aos varistores associados aos desligadores convencionais e aos varistores associados com os desligadores eletromecânicos. Além disso, também estão apresentados os riscos de referência em relação aos para-raios serviço leve ($PR_{(SL)}$), serviço normal ($PR_{(SN)}$) e serviço pesado ($PR_{(SP)}$). Em relação à Fig. 6.30, nota-se que os desligadores convencionais (DC_1 e DC_2) e o desligador eletromecânico serviço leve (DE_1) possivelmente irão influenciar na retirada do para-raios fabricado com o varistor V_1 precocemente do sistema.

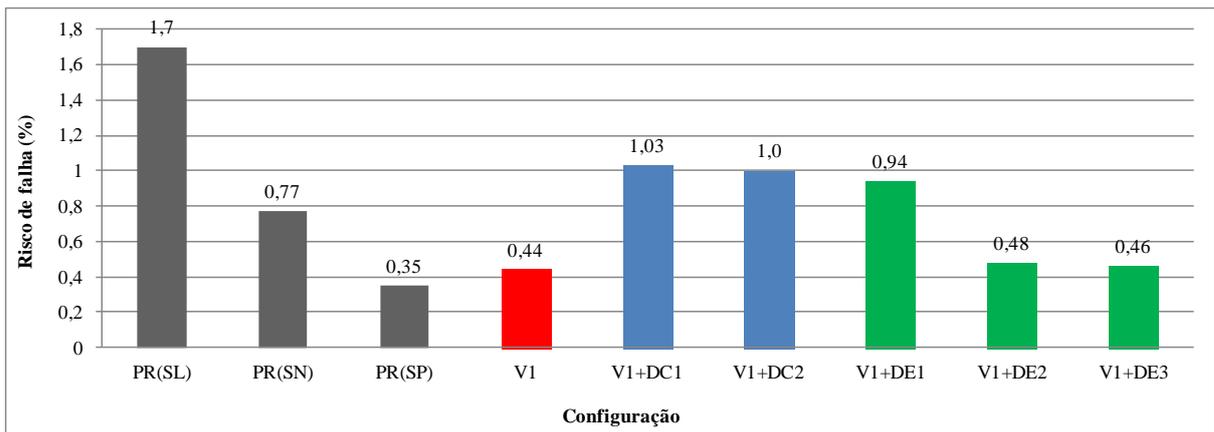


Fig. 6.30 - Influência dos desligadores no desempenho do varistor V_1 .

No que se refere à Fig. 6.31, nota-se, novamente, que os desligadores convencionais (DC_1 e DC_2) e o desligador eletromecânico serviço leve (DE_1) serão os responsáveis pela retirada precoce do para-raios do sistema. No entanto, verifica-se que, ao associar o varistor V_2 com o desligador eletromecânico serviço normal (DE_2), o aumento do risco de falha foi de apenas de 0,01 % e, além disso, na associação envolvendo o desligador eletromecânico

serviço pesado o risco de falha não sofreu alteração, indicando que possivelmente o desligador não será o responsável pela retirada precoce do para-raios do sistema.

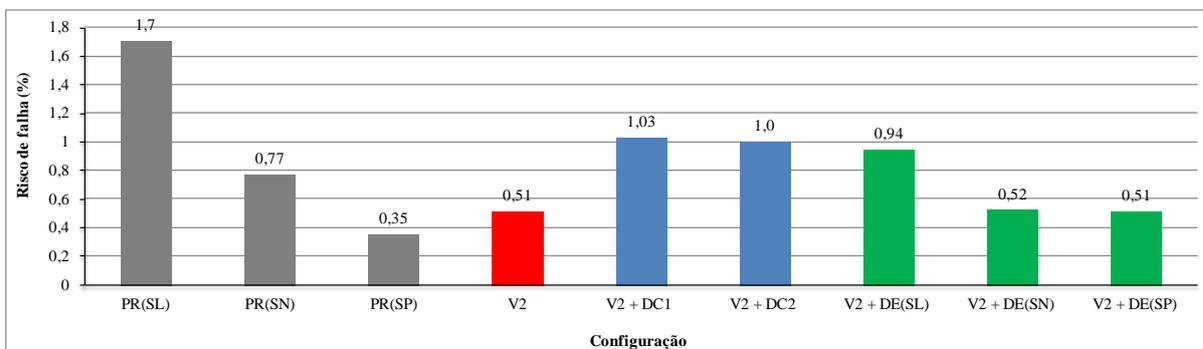


Fig. 6.31 - Influência dos desligadores no desempenho do varistor V_2 .

6.4 - Comentários

A partir dos resultados elencados no decorrer do presente capítulo, verificou-se que os varistores V_1 e V_2 apresentaram suportabilidades mínimas adequadas a um para-raios capaz de suportar no mínimo dois impulsos de 65 kA e 40 kA. No entanto, o risco de falha relativo ao varistor V_2 é inferior ao risco de falha relativo ao para-raios de 40 kA considerado ideal.

O comportamento das curvas de suportabilidade desses dispositivos justifica o resultado obtido. Visto que mesmo apresentando características elétricas compatíveis com a mesma condição de serviço, o varistor V_2 e o para-raios de 40 kA apresentam curvas distintas de suportabilidade.

A curva relativa ao varistor V_2 apresentou valores mais dispersos em relação à média do que a curva relativa ao para-raios de 40 kA. Logo, há uma proporção discreta na elevação da curva de suportabilidade do varistor V_2 provocando um risco de falha menor.

Ao que se refere à influência dos dois projetos de desligadores convencionais no desempenho dos varistores, ficou evidente que os desligadores analisados não cumprem suas funções protetivas pelas quais foram desenvolvidos e, dessa forma, comprometem a operação dos mesmos.

A associação do varistor V_1 com o desligador DC_1 provocou um aumento de 134 % na probabilidade do para-raios ser retirado de campo de forma prematura. Quando esse varistor foi associado ao segundo projeto do desligador convencional (DC_2), o resultado obtido foi uma discreta redução no risco de falha. Isso alterou a probabilidade da retirada do dispositivo de modo prematuro de 134 % para 127 %.

A influência dos desligadores convencionais analisados no desempenho dos varistores torna-se mais evidente quando se observa o valor do risco de falha através das configurações

V_{1+DC_1} e V_{2+DC_1} . Nota-se que os riscos de falha são iguais mesmo considerando projetos distintos de varistores. Além disso, resultado semelhante também é observado associando o desligador DC_2 aos varistores V_1 e V_2 .

Esses resultados certificam que para-raios de distribuição são comumente retirados de campo devido a falha na operação do desligador automático convencional.

Por último, cabe mencionar que, em relação aos desligadores eletromecânicos, os três projetos analisados apresentaram excelente precisão de atuação. Tal afirmação é justificada com base no valor do desvio padrão de cada projeto desenvolvido.

Em relação ao desligador DE_1 , foi obtido um desvio padrão igual a 0,3 kA. Já o desligador DE_2 apresentou um valor igual a 2,6 kA e, por fim, o desvio padrão relativo ao desligador DE_3 foi de 1,2 kA. Isso é um indicativo de que o desligador eletromecânico tem uma atuação mais precisa que o desligador convencional, permitindo uma coordenação mais eficiente entre o desligador e o para-raios.

Em relação ao risco de falha, ficou evidente que utilizar desligadores eletromecânicos no sistema de distribuição irá reduzir o custo das concessionárias de energia com a substituição indevida de para-raios em boas condições operacionais.

CAPÍTULO 07

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são feitos comentários acerca da hipótese levantada, das conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho e das sugestões de trabalhos futuros.

7.1 - Sobre a hipótese inicial

A partir da presente tese foi possível constatar que é possível desenvolver desligadores automáticos mais eficientes que os projetos convencionais. Nota-se que o desenvolvimento desses dispositivos deve ser feito com base nas condições operacionais de serviço. No entanto, para que o desligador automático opere corretamente é preciso que ele coordene com o para-raios. Isto é, o desligador automático e o para-raios devem ser dimensionados de acordo com as necessidades reais das correntes que são descarregadas no sistema primário de distribuição. Dessa forma, será possível proporcionar melhorias para o sistema elétrico, elevando a eficiência na proteção dos transformadores e, além disso, reduzir custos operacionais provenientes da retirada precoce de para-raios do sistema.

7.2 - Conclusões

Desde o surgimento dos primeiros para-raios, utilizados nos sistemas de telecomunicações na década de 1840 até os dias atuais, nota-se que a evolução desses dispositivos está diretamente relacionada com o progresso do sistema elétrico.

À medida que o sistema elétrico evoluía, elevando o nível de tensão e conseqüentemente alterando as suas características, melhorias nos projetos dos para-raios eram necessárias. Em virtude disso, é possível afirmar que suas histórias se misturam.

Conectado em série com o para-raios está o desligador automático. Sua função é desconectar o para-raios do sistema quando ele é submetido a solicitações acima da sua capacidade, ou quando apresenta níveis de degradação que resultam em correntes elevadas de caráter permanente. Além disso, também tem a função de sinalizar a operação severa do para-raios indicando a necessidade de sua substituição.

Estudos sobre a evolução desses dispositivos mostram que todos os projetos desenvolvidos eram compostos por uma cápsula contendo pólvora, resultando em uma série de problemas operacionais. Além do risco de acidentes envolvendo transeuntes, a operação indevida do desligador automático resulta em custos adicionais para as concessionárias de energia elétrica, uma vez que para-raios em boas condições operacionais estão sendo retirados do sistema em virtude da falha de um dispositivo que apresenta um valor médio em torno de 5% do valor do para-raios. Dessa forma, condena-se o componente principal pela atuação incorreta de um acessório.

Os custos relativos à operação incorreta do desligador automático envolvem gastos com a equipe de manutenção que irá substituir o equipamento e o valor do dispositivo que será substituído, repassados, de certa forma, ao consumidor através das revisões tarifárias. Para evitar esses problemas é preciso modificar o princípio de atuação do desligador automático, evitando que a sua operação ocorra através de uma explosão. Dessa forma, será possível obter um dispositivo que opere de acordo com as características previstas nas normas vigentes. Ou seja, um dispositivo capaz de atuar corretamente frente à condição de serviço para o qual foi projetado e, além disso, atue corretamente quando o para-raios estiver danificado.

A solução encontrada foi desenvolver um desligador automático com a parte ativa composta por um elemento fusível especial. O novo desligador, denominado de desligador automático eletromecânico, foi desenvolvido utilizando novos materiais e técnicas estatísticas de análise de taxa de falhas.

O projeto de um desligador automático deve atender à correntes específicas de natureza atmosférica, de manobra e na frequência industrial. Neste trabalho foi possível apresentar o desenvolvimento e a avaliação do desempenho do desligador automático eletromecânico. Tal dispositivo foi desenvolvido com o objetivo principal de reduzir o elevado número de para-raios que são retirados do sistema de média tensão, ainda em boas condições operacionais, em virtude da atuação indevida do desligador automático convencional.

Foram desenvolvidos três projetos de desligadores eletromecânicos, onde cada projeto está relacionado com o regime de trabalho dos para-raios de distribuição. Isto é, um projeto para a condição de serviço leve, outro para a condição de serviço normal e outro para a condição de serviço pesado.

Os desligadores desenvolvidos apresentaram excelente desempenho durante os ensaios. Além da atuação sem lançamento de fragmentos, destaca-se também a precisão durante a operação. A partir dos ensaios foram obtidos desvios padrão de 0,3 kA para DE₁, 2,6 kA para DE₂ e 1,2 kA para DE₃. Esses resultados indicam que o desligador eletromecânico tem uma atuação mais precisa que o desligador convencional, possibilitando uma coordenação mais eficaz entre o desligador e o para-raios.

Em relação à influência dos desligadores no desempenho do para-raios, inicialmente foi verificada a influência do desligador convencional. A partir dos resultados obtidos, ficou evidente que os desligadores analisados não cumprem suas funções protetivas pelas quais foram desenvolvidos, alcançando valores entre 96 % e 134 % no aumento do risco do para-raios ser retirado de campo prematuramente. Em virtude disso, tais resultados corroboram com o que foi discutido no capítulo 4 em relação às falhas atribuídas ao desligador automático, tornando-os responsáveis pelo elevado número de para-raios que são retirados de campo ainda em boas condições operacionais.

Ao que se refere ao desligador eletromecânico, as influências nos desempenhos dos varistores foram iguais a 0 %, 2 %, 4,5 %, 9,1 %, 84 % e 114 %. A maior influência foi obtida a partir da associação envolvendo o desligador DE₁ e os varistores V₁ e V₂. No entanto, esse desligador foi desenvolvido para operar sob condições de serviço leve. Já o varistor V₁ apresenta característica da condição de serviço normal e o varistor V₂ apresenta característica próxima dessa condição de serviço, condenando, para esta configuração, a associação com o desligador DE₁. Isso indica que o desligador e o para-raios devem pertencer a mesma condição de serviço para que o conjunto obtenha desempenho eficaz, conforme observado no comportamento dos desligadores DE₂ e DE₃.

O desligador eletromecânico é um dispositivo de menor custo e mais adequado para as redes de distribuição brasileiras, permitindo atuações precisas frente a surtos de origem atmosférica, de manobra e correntes na frequência industrial. Além disso, não opera através de uma explosão sendo considerado um dispositivo seguro para equipamentos e transeuntes locais. É um dispositivo que agrega confiabilidade na proteção de transformadores contra surtos e possibilita reduzir os custos das concessionárias de energia relativos à manutenções e tarifas.

7.3 - Trabalhos futuros

Em complemento ao desenvolvimento deste trabalho, surge a necessidade de um estudo envolvendo para-raios de serviço leve, serviço normal e serviço pesado, em substituição aos varistores utilizados, associados aos três projetos de desligadores eletromecânicos desenvolvidos. Desse modo, seriam utilizadas metodologias existentes para a avaliação do desempenho dos equipamentos, tais como uma sequência adaptada de ensaios, baseada em ensaios de tipo definidos por normas internacionais, e técnicas estatísticas de análise de taxa de falhas. Outra necessidade se refere ao acompanhamento desses dispositivos verificando o seu desempenho após a instalação no sistema elétrico de distribuição.

7.4 - Publicações

As publicações referentes ao presente trabalho resultam da parceria realizada entre o Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luís Barreira Martinez, a AES Sul -Distribuidora Gaúcha de Energia e a PLP - Produtos Preformados para Linhas. Essa parceria foi formalizada através do projeto de P&D - Pesquisa e Desenvolvimento intitulado “Projeto, Manufatura e Aplicação de Para-raios para Redes de Média Tensão com Base em Solicitações de Corrente e Energia Levantadas em Campo”.

- WANDERLEY NETO, ESTÁCIO TAVARES; DINIZ, AELLFLENITON MOURONER MACIEL; MARTINEZ, MANUEL LUÍS BARREIRA; CAMPOS, BRUNO SOUZA NANNI. Automatic disconnector: Influence on the performance of medium voltage arresters and a new design proposal. *Electric Power Systems Research*, v. 118, p. 62-68, 2014.
- DINIZ, AELLFLENITON MOURONER MACIEL; MARTINEZ, M. L. B.; WANDERLEY NETO, E. T.; G.J.G. dos Santos. Para-raios de Distribuição: Desenvolvimento de Desligadores Automáticos Com Base em Elementos Fusíveis. *Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, 2014, Santos.
- MARTINEZ, M. L. B.; WANDERLEY NETO, E. T.; DINIZ, A. M. M.; CAMPOS, B. N.. Development of “Non Gunpowder” Disconnectors.. *INMR World Congress*, 2013, Vancouver.
- WANDERLEY NETO, E.T.; MARTINEZ, M. L. B.; DINIZ, A. M. M.. Restrictions on the Performance of Medium Voltage Arresters Due to Automatic Disconnector. *International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, 2013, BELO HORIZONTE, 2013.

7.5 - Patente

Além das publicações, do presente trabalho também resultou uma propriedade intelectual. O registro de patente relativa ao desligador automático, conforme registro BR 10 2013020967 8, no INPI, é descrita como “A presente invenção refere-se a um desligador eletromecânico, polimérico, sem pólvora, destinado a proteger equipamentos elétricos de descargas provenientes de impulsos de corrente, bem como de sobrecorrentes em frequência industrial. Ou seja, trata-se de proteger tais equipamentos, tais como para-raios, de situações em que são geradas correntes elétricas maiores do que aquela para o qual o equipamento foi projetado para suportar. Com isso, o desligador eletromecânico da presente invenção é capaz de se desconectar do sistema evitando que a corrente circule entre os terminais (polos) do para-raios”.

CAPÍTULO 08

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Martinez, M. L. B.; Picanço, A. F.; Lefort, C.; Salles, C.; Silva, P. O.; Carvalho, R. B. B.; Faveri, R.; Cerqueira Júnior, T.; Coelho Júnior, V. A. C: Relatório AES Sul R-AES-05 – “Análises Comparativas – Correntes Descarregadas pelos Pára-Raios”. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento AES Sul/UNIFEI/FUPAI. Itajubá, 2008.
- [2] M. Saran, Martinez, M. L. B, Lightning Performance of Medium Voltage Overhead Lines, Proceedings of The X International Symposium on Lightning Protection - SIPDA, Curitiba, 2009.
- [3] M. L. B. Martinez, “Para-raios para Sistemas de Média Tensão – Características Técnicas e Aplicação a Sistemas de Potência”. Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – 1992.
- [4] Woodworth, J.; “History of Arrester on Power Systems 1750 – 1890”, ArresterWorks, 2011.
- [5] Woodworth, J.; “History of Arrester on Power Systems 1890 – 1930”, ArresterWorks, 2011
- [6] Woodworth, J.; “The Electrolytic Arrester Story”, ArresterWorks, 2011
- [7] Sakshaug, E. C.: “A Brief History of AC Surge Arresters”. IEEE Power Engineering Review, August, 1991.
- [8] Franco, J. L. Curso sobre Para-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão, Franco Engenharia, São Paulo, 174., 2001
- [9] Costa, E. G.: “Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco”. Tese de Doutorado, COPELE/UFPB, Campina Grande, Abril, 1999.
- [10] ABB Switchgear: “Physical properties of zinc oxide varistors”. ABB Power Technology Products AB, 2001.
- [11] Wanderley Neto, E. T., “Monitoramento e Diagnóstico de Pára-Raios a ZnO através de Redes Neurais Artificiais”. Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, Agosto, 2007.
- [12] Gupta, T. K.: “Application of zinc oxide varistors”. J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, N° 7, pp. 1817-1840, 1990.
- [13] Martinez, M. L. B., “Capacidade de Absorção de Energia de Resistores a Óxido Metálico – Considerações Teóricas e Métodos de Avaliação”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.
- [14] Carlson, W. G.; Gupta, T. K; Sweetana, A.: “A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, N° 2, pp. 67-73, April 1986.
- [15] IEC 60099-4 – Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, International Standard, Edition 2.1, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2006.
- [16] ANSI C62-11-1999, “IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arrester for AC Power Circuits (> 1 kV)”. Institute of Electric and Electronic Engineers, Inc. New York, USA, 1999.

- [17] PROJETO DE NORMA 03:037.07-002: “Pára-raios de Resistor não Linear a Óxido Metálico sem Centelhadores, para Circuitos de Potência de Corrente Alternada - Método de Ensaio”. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [18] Woodworth, J.; “The Early History of Arrester Disconnectors”, ArresterWorks, 2009.
- [19] Woodworth, J.; “Arrester Disconnecter”, ArresterWorks, 2008.
- [20] HINRICHSEN, V.: “Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems Fundamentals”. 3st Edition. Siemens - Power Transmission and Distribution Power Voltage Division, Berlin, 2011.
- [21] Verdolin, R. T., De Franco, J. L., Mundim, A. O. F. “Avaliação do Desempenho do Desligador Automático de Pára-raios de Distribuição”. Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 1988.
- [22] Diniz, A. M. M., “Ensaio e Avaliação Elétrica De Um Novo Projeto De Para-Raios Para Sistemas De Distribuição Em Média Tensão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2011.
- [23] J. Franco, Arresters Disconnecter Performance under Laboratory Test. Proceedings of the VI International Symposium on High Voltage Engineering - ISH, 1989.
- [24] Wanderley Neto, E. T.; Perrelli, J. E. D.; Martinez, M. L. B.; Cabral, S. S. ; Menezes, M. A. A. ; Vieira, T. T. ; Shiraige, F. H. . Definição de Limites Operacionais de Para-raios em Sistemas de Distribuição. III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2010, Belém.
- [25] Salles, C.; Picanço, A. F.; Martinez, M. L. B.; Borges, C. L.; Oliveira, H. R. P. M., “Discharged Current on Surge Arresters in Distribution Networks”. Proceedinds of The X SIPDA - International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, 2009.
- [26] Wanderley Neto, E. T.; Martinez, M. L. B.; Salles, C; Cabral, S. S.; Menezes, M. A. A.; Vieira., “Recomendações para Remoção de Para-Raios em Rede de Distribuição Com Base na Corrente de Fuga”. Proceedinds of The XIV Encontro Ibero-americano do Cigré, Paraguai, 2011.
- [27] Wanderley Neto, E. T.; Diniz, A. M. M.; Martinez, M. L. B.; Campos, B. S. N. Automatic disconnecter: Influence on the performance of medium voltage arresters and a new design proposal. Electric Power Systems Research, 2014.
- [28] Martinez, M. L. B.; Wanderley Neto, E. T.; Diniz, A. M. M.; Campos, B. N.. Development of 'Non Gunpowder' Disconnectors.. In: 2013 INMR World Congress, 2013, Vancouver. 2013 INMR World Congress - Proceedings, 2013.
- [29] IEEE Std 4 - Standard Techniques for High Voltage Testing, 1995.
- [30] INTERNATIONAL STANDARD. IEC 60060-1: High Voltage Test Techniques – Part 1: General Definitions and Requirements. Geneva. 2010.
- [31] Hauschild, W., Mosch, W. Statistical Techniques for High-voltage Engineering. English Edition. United Kingdom. Peter Peregrinus Ltd. 1992.
- [32] P. M. Anderson, Power System Protection, The Institute of Electrical and Electronic Engineers, INC, New York, 1999.
- [33] A Wright, Electric Fuses (Power & Energy) - The Institution of Engineering and Technology; 3rd edition (September 10, 2004)

- [34] Dixon, W. J., Mood, A. M. A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data. Journal of the American Statistical Association. Vol. 43, No 241. Mar., 1948.
- [35] IEC 60060-1 – High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements. International Standard. International Electrotechnical Commission, Switzerland.
- [36] Hauschild, W., Mosch, W. Statistical Techniques for High-voltage Engineering. English Edition. United Kingdom. Peter Peregrinus Ltd. 1992.
- [37] Carrara, G., Delleria, L. Accuracy of an Extended *Up-and-Down* Method in Statistical Testing of Insulation. Study Committee No. 33 (Overvoltages and Insulation Coordination). CIGRÉ, Electra No. 23. July, 1972.
- [38] NBR 5434, “Redes de Distribuição Aérea Urbana de Energia Elétrica - Padronização”.
- [39] K. Eda, “Destruction Mechanism of ZnO Varistors Due to High Currents”, Journal of Applied Physics, Vol. 56, N° 10, pp. 2948 - 2954, 1984.
- [40] M. Martinez, L. Zanetta Junior, “A Proposal to Evaluate the Energy Withstanding Capacity of Metal Oxide Resistors”, Proceedings of The XI International Symposium on High Voltage Engineering - ISH, London, 1999.
- [41] Wanderley Neto, E. T.; Diniz, A. M. M.; Martinez, M. L. B.; “Restrictions on the Performance of Medium Voltage Arresters Due to Automatic Disconnectors”. In: International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), 2013, BELO HORIZONTE. International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), 2013.
- [42] Diniz, A. M. M.; Martinez, M. L. B.; Wanderley Neto, E. T.; Nobrega, A. M.; Nunes, A. A.; Uchoa, J.; “Projeto de Para-raios Com Base em Uma Sequência Reduzida de Ensaios e Análise de Risco”. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiânia. SBSE, 2012.
- [43] Wanderley Neto, E. T.; Martinez, M. L. B.; Diniz, A. M. M.; Dos Santos, G. J. G.; Campos, B. N. “10 kA distribution arresters: The adequate choice for medium voltage networks”. In: 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2012, Vienna. 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). p. 1.
- [44] Wanderley Neto, E. T.; Diniz, A. M. M.; Martinez, M. L. B.; Oliveira, H. R. P. M.; Salles, C.; Uchoa, J. “Análise da Taxa de Falhas em Para-raios de Distribuição de Acordo com Estimativas de Correntes de Descarga”. In: XIV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ - XIV ERIAC, 2011, Ciudad del Este - Paraguai. XIV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ - XIV ERIAC, 2011.
- [45] Diniz, A. M. M.; Martinez, M. L. B.; Wanderley Neto, E. T.; Nunes, A. A.; Nobrega, A. M.; Oliveira, H. R. P. M.; Uchoa, J. “Análise de Um Projeto de Para-raios de 5 kA Com Base na Taxa de Falhas”. In: V CITTES, 2011, Salta. V CITTES, 2011.
- [46] OLIVEIRA, Hermes R P M de; Edson Batista; MARTINEZ, Manuel Luís Barreira; de SALLES, Credson. Searching the Amplitude of the Short Duration Impulse Currents Discharged by Medium Voltage Surge Arresters. In: IEEE Electrical Insulation Conference, 2009, Montreal. IEEE Electrical Insulation Conference, 2009.
- [47] PICANÇO, Alessandra Freitas; MARTINEZ, Manuel Luís Barreira; de SALLES, Credson. Determination of the Discharge Current on Distribution Network Surge Arresters. In: PowerTech, 2009.

- [48] D'Ajuz, Ary, Fonseca, Cláudio S., Carvalho, F. M. Salgado, Filho, Jorge Amon, Dias, L. E. Nora, Pereira, Marco Polo, Esmeraldo, Paulo César V., Vaisman, Roberto e Frontin, Sérgio O. (1987). "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento." EDUFF, Rio de Janeiro.

ANEXO 1

- ENSAIOS REALIZADOS NOS ELOS FUSÍVEIS DO GRUPO EF -

No Anexo 1 estão apresentados os resultados dos ensaios de “Up-and-Down” realizados nos elos fusíveis do grupo EF.

Tabela A1. 1 - *Up-and-Down* em elos fusíveis do grupo EF₁.

	Amostra														
V[kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8,0			X								X				X
7,5		O		X		X		X		O		X		O	
7,0	O				O		O		O				O		
I[kA]	7,0	7,5	8,0	7,5	7,0	7,5	7,0	7,5	7,0	7,4	8,0	7,4	7,0	7,5	8,0
V[kV]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27			
8,0				X		X		X				X			
7,5	X		O		O		O		X		O				
7,0		O								O					
I[kA]	7,4	7,0	7,5	8,0	7,4	8,0	7,4	8,0	7,4	7,0	7,5	8,0			

Tabela A1. 2- *Up-and-Down* em elos fusíveis do grupo EF₂.

	Amostra														
V[kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
12,0							X		X		X				
11,5						O		O		O		X		X	
11,0			X		O								O		X
10,5		O		O											
10,0	O														
I[kA]	10,1	10,6	11,0	10,6	11,0	11,4	11,9	11,4	11,9	11,4	11,9	11,4	11,0	11,4	11,0
V[kV]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27			
12,0															
11,5			X		X		X		X		X				
11,0		O		O		O		O		O		O			
10,5	O														
10,0															
I[kA]	10,7	11,0	11,4	11,0	11,4	11,0	11,4	11,0	11,4	11,0	11,4	11,0			

Tabela A1. 3 - *Up-and-Down* em elos fusíveis do grupo EF₃.

	Amostra															
V[kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
37																
36																
35							X		X						X	
34						O		O		X				O		O
33					O						X		O			
32		X		O								O				
31	O		O													
I[kA]	30,4	31,2	30,4	31,2	35,2	36,4	36,8	36,4	36,8	36,4	35,2	31,2	35,3	36,4	36,8	36,4
V[kV]	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
37									X							
36								O		X		X		X		X
35	X		X		X		O				O		O		O	
34		O		O		O										
33																
32																
31																
I[kA]	36,8	36,4	36,8	36,4	36,8	36,4	36,8	38,4	39,2	38,4	36,8	38,4	36,8	38,4	36,8	38,4

Tabela A1. 4 - *Up-and-Down* em elos fusíveis do grupo EF₄.

	Amostra														
V[kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
82											X		X		X
80										O		O		O	
78							X		O						
76				X		O		O							
74			O		O										
72		O													
70	O														
I[kA]	55,2	57,2	59,6	61,6	59,6	61,6	64	61,6	64	65,6	67,2	65,6	67,6	65,6	67,6
V[kV]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
82		X				X									
80	O		X		O		X		X		X		X		
78				O				O		O		O		X	
76															X
74															
72															
70															
I[kA]	65,6	66,8	65,6	64,0	65,6	66,4	65,6	64,0	65,6	64,0	65,6	64,0	65,6	65,6	61,6

ANEXO 2

- ENSAIOS REALIZADOS NOS ELOS FUSÍVES DO GRUPO EF_(B) –

No Anexo 2 estão apresentados os resultados dos ensaios de “Up-and-Down” realizados nos elos fusíveis do grupo EF_(B).

Tabela A2. 1- *Up-and-Down* em elos fusíveis do grupo EF_{(B)1}.

		Amostra														
V[kV]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16,5																
16,0			X		X		X		X		X		X		X	
15,5		O		O		O		O		O		O		O		O
15,0		O														
I[kA]		15,0	15,6	16,2	15,6	16,15	15,6	16,2	15,6	16,2	15,6	16,2	15,6	16,2	15,6	16,2
		Amostra														
V[kV]		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16,5								X								
16,0		X		X		O		X		X		X		X		
15,5		O		O		O				O		O		O		O
15,0																
I[kA]		15,6	16,2	15,6	16,2	15,6	16,2	16,5	16,2	15,6	16,2	15,6	16,2	15,6	16,2	15,6

Tabela A2. 2- *Up-and-Down* em elos fusíveis do grupo EF_{(B)2}.

		Amostra														
V[kV]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16,5							X									
16,0				X		O		X		X		X		X		X
15,5		O	O		O				O		O		O		O	
15,0		O														
I[kA]		14,8	15,6	16,0	15,6	16,0	16,5	16,0	15,6	16,0	15,6	16,0	15,6	16,0	15,6	16,0
		Amostra														
V[kV]		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16,5																
16,0		X		X		X		X		X		X				
15,5		O		O		O		O		O		O		X		O
15,0															O	
I[kA]		15,6	16,0	15,6	16,0	15,6	16,0	15,6	16,0	15,6	16,0	15,6	160	15,6	14,8	15,6

Tabela A2. 3- *Up-and-Down* em elos fusíveis do grupo EF_{(B)3}.

V[kV]	Amostra								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
33,0					X		X		
32,5		X		O		O		X	
32,0	O		O						O
I[kA]	32	32,4	32	32,4	33,2	32,4	33,2	32,4	32

Tabela A2. 4- *Up-and-Down* em elos fusíveis do grupo EF_{(B)5}.

V[kV]	Amostra														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
61															
60															
59															
58															O
57										X				O	
56									O		X		O		
55						X		O				O			
54					O		O								
53		X		O											
52	O		O												
I[kA]	78,4	80,8	77,6	80,8	81,6	83,2	80,8	83,2	84,8	94,4	106,0	83,2	84,8	86,4	88,0
V[kV]	16	17	18	19	20	21	22	23	24						
61									O						
60		X						O							
59	O		X		X		O								
58				O		O									
57															
56															
55															
54															
53															
52															
I[kA]	89,6	91,2	89,6	88,0	89,6	88,0	88,8	91,2	92,8						

Tabela A2. 5- *Up-and-Down* em elos fusíveis do grupo EF_{(B)6}.

	Amostra														
V[kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
66															
64															
62												X		X	
60											O		O		O
58				X						O					
56			O		X				O						
54		O				X		O							
52	O						O								
I[kA]	79,2	80,8	87,2	90,4	87,2	98,4	74,4	77,6	80,0	83,2	87,2	89,6	86,4	90,4	86,4
V[kV]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
66			X												
64		O		X											
62	O				X										
60															
58															
56															
54															
52															
I[kA]	88,8	92,8	96,8	94,4	88,8										