

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

Modelo Elétrico de Supressor de Surto de ZnO com Ampla Faixa de Operação

Valdemir da Silva Brito

Campina Grande - Paraíba - Brasil

© Valdemir, outubro de 2016.

Valdemir da Silva Brito

**Modelo Elétrico de Supressor de Surto de ZnO com
Ampla Faixa de Operação**

Tese de doutorado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Edson Guedes da Costa, D.Sc.

Orientador

George Rossany Soares de Lira, D.Sc.

Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Outubro de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B862m Brito, Valdemir da Silva.
Modelo elétrico de supressor de surto de ZnO com ampla faixa de operação / Valdemir da Silva Brito. – Campina Grande-PB, 2016.
156 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa e Prof. Dr. George Rossany Soares de Lira".

Referências.

1. Modelo Elétrico. 2. Para-raios. 3. Supressores de Surto. 4. Ensaio Elétricos. 5. Impulsos de Corrente. 6. Sobretensões. I. Costa, Edson Guedes da. II. Lira, George Rossany Soares de. III. Título.

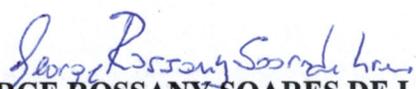
CDU 621.316.933(043)

"MODELO ELÉTRICO DE SUPRESSOR DE SURTO DE ZnO COM AMPLA FAIXA DE OPERAÇÃO"

VALDEMIR DA SILVA BRITO

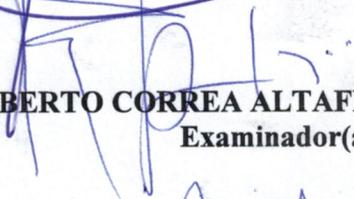
TESE APROVADA EM 07/10/2016

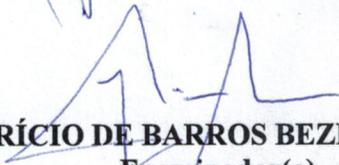

EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)


GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Examinador(a)


DAMASIO FERNANDES JUNIOR, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


RUY ALBERTO CORREA ALTAFIM, Dr., USP-São Carlos
Examinador(a)


JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, D.Sc., UFPE
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

À minha família.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Manuel e Marina, pela minha vida, pelo exemplo de dedicação e perseverança, pela compreensão, carinho e amor.

Aos meus irmãos Vanderlei e Vanderleya, pela amizade, pelo companheirismo, pelo apoio e confiança.

À minha esposa Samara e ao nosso filho Gabriel, pela confiança, pela compreensão da minha ausência em muitos momentos de suas vidas, pelo apoio, incentivo, dedicação e amor.

Aos professores Edson Guedes e George Rossany pela orientação, pela amizade, pelo incentivo e confiança em mim depositada.

Aos professores Ruy Altafim, José Maurício, Washington Neves e Damásio Fernandes por suas sugestões e contribuições para melhoria deste trabalho.

Ao professor Tarso Vilela pela amizade, incentivo e por ter sido o responsável pelo meu ingresso na pesquisa acadêmica.

Aos Amigos do Laboratório de Alta Tensão (LAT), pela amizade e incentivo na realização deste trabalho, em especial Ronimack Trajano, Jalberth Fernandes, Pablo Vilar e Malone Castro.

Aos Latianos Ramon Dias, Raphael Borges, Luiz Augusto e Gabriel Vidal pelo auxílio na realização dos experimentos.

Aos amigos de graduação Arthur, Laécio, Bruno, João Paulo e Miquéias, pela amizade, companheirismo e contribuições na minha vida acadêmica.

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro durante quase toda a vigência do curso.

À Chesf, na pessoa do Eng. Marcelo Maia, pelo suporte através do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) CTNI-92.2011.3500.00, disponibilizando materiais e recursos financeiros para a realização da pesquisa.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Valdemir da Silva Brito

"A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo."

Albert Einstein

Lista de Figuras

1.1	Curvas $V-I$ típicas de um supressor de surto de ZnO com valores de tensão normalizados pela tensão residual para o impulso de corrente $8/20 \mu s - 10 \text{ kA}$.	5
1.2	Curva $V-I$ de supressor do surto utilizado em um estudo de caso real modelado de duas formas diferente.	9
2.1	Configuração de um supressor de surto de ZnO com invólucro de porcelana.	16
2.2	Varistores com diâmetros e alturas diferentes.	17
2.3	Varistor de ZnO. (a) Representação esquemática da microestrutura. (b) Estrutura microscópica típica a partir da microscopia eletrônica de varredura.	18
2.4	Curva $V-I$ típica de um supressor de surto de ZnO utilizado em um sistema de 420 kV.	19
2.5	Características da densidade de corrente versus campo elétrico de um varistor com a temperatura.	21
2.6	Curva de estabilidade térmica do supressor de surto de ZnO.	22
3.1	Modelo proposto por Harnden et al. (1972).	24
3.2	Modelo proposto por Levinson e Philipp (1975).	25
3.3	Modelo proposto por Levinson e Philipp (1976).	25
3.4	Modelo proposto por Schmidt et al. (1989).	26
3.5	Característica do elemento A em função de i e di/dt	27
3.6	Curvas características do varistor de ZnO para diferentes frequências. . . .	28
3.7	Modelo proposto por Haddad et al. (1990).	28
3.8	Modelo proposto por Haddad e Naylor (1999).	29
3.9	Modelo proposto por Xin et al. (2011).	30
3.10	Modelo da resistência não linear (Modelo Convencional).	32

3.11	Efeito dinâmico do supressor de surto de ZnO.	33
3.12	Modelo proposto por Tominaga et al. (1979).	34
3.13	Valor Normalizado da Indutância L_e	34
3.14	Modelo proposto por Hileman et al. (1990).	35
3.15	Modelo proposto por IEEE Working Group 3.4.11 (1992).	35
3.16	Relação $V-I$ das resistências não lineares do modelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992).	36
3.17	Modelo proposto por Kim et al. (1996).	37
3.18	Modelo proposto por Hagiwara et al. (1997).	37
3.19	Característica da diferença de tensão entre a tensão medida e a tensão obtida utilizando o modelo da resistência não linear $R(i)$ para a forma de onda $8/20 \mu s$	38
3.20	Modelo proposto por Pinceti e Giannettoni (1999).	39
3.21	Modelo proposto por Fernandez e Diaz (2001).	40
3.22	Modelo proposto por Mardira e Saha (2002).	41
3.23	Modelo proposto por Zitnik et al. (2005).	43
3.24	Modelo proposto por Valsalal et al. (2011).	43
3.25	Modelo proposto por Brito (2013).	44
3.26	Modelo proposto por Unahalekhaka (2014).	45
3.27	Modelo proposto por Triruttanapiruk e Yurthagowith (2014).	46
3.28	Circuito elétrico do gerador de impulso de corrente incluindo o sistema de medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO.	50
3.29	$Loop$ indutivo entre supressor de surto e equipamento a ser protegido.	53
4.1	Fotografia dos tipos de varistores de ZnO ensaiados.	57
4.2	Arranjo experimental utilizado no ensaio de caracterização.	59
4.3	Fotografias: (a) Kit de alta tensão. (b) Mesa de controle e osciloscópio para aquisição de dados.	59
4.4	Formas de onda da tensão e corrente medidas na região de baixas correntes.	60
4.5	Curvas características $V-I$ na região de baixas correntes.	60

4.6	Fotografia do gerador de impulso de corrente do LAT-UFCG. (a) Capacitores, indutores, resistores, centelhador. (b) Transformador elevador de tensão e diodo retificador.	62
4.7	Fotografia do gerador de impulso de corrente do LAT-UFCG e suporte isolante para o varistor.(a) Mesa de controle. (b) Suporte isolante contendo o varistor tipo B sob ensaio.	62
4.8	Diagrama elétrico do gerador de impulso de corrente utilizado.	63
4.9	Impulsos de corrente de manobra (30/60 μ s) e as respectivas tensões residuais medidas no varistor A2.	65
4.10	Fotografia dos blocos de alumínio ensaiados.	65
4.11	Fotografia mostrando a medição de tensão: (a) No varistor de ZnO. (b) No bloco de alumínio.	66
4.12	Impulsos de corrente de manobra (30/60 μ s) e as respectivas tensões residuais medidas no varistor E1.	67
4.13	Diferentes impulsos de corrente com amplitude de 10 kA e as respectivas tensões residuais medidas no varistor A2. (a) corrente. (b) tensão.	70
4.14	Tensões residuais medidas e compensadas. (a) medidas no varistor A2 e no bloco de alumínio. (b) Tensões residuais compensadas.	72
4.15	Impulsos de corrente 8/20 μ s e as respectivas tensões residuais normalizadas, medidas no varistor C1.	73
4.16	Impulsos de corrente e tensões residuais médias e normalizadas para quatro diferentes formas de onda e várias amplitudes de corrente.	73
4.17	Gerador de impulso de corrente do LAT-UFCG. (a) Diagrama esquemático do circuito do gerador de impulso de corrente e arranjo de medição. (b) Fotografia do gerador de impulso de corrente e arranjo de medição.	75
4.18	Fotografias mostrando o afastamento da ponta de prova de alta tensão em relação ao supressor de surto. Distância de: (a) 10 cm. (b) 1 m.	76
4.19	Tensões e correntes medidas no supressor de surto de distribuição e em suas proximidades. Tensões induzidas medidas no: (a) Lado direito - 10 cm; (b) Lado esquerdo - 10 cm; (c) Lado direito - 20 cm; (d) Lado esquerdo - 20 cm; (e) 1 m; (f) 2 m.	78

4.20	Ensaio em supressor de surto com invólucro de material polimérico. (a) Supressor de surto com invólucro de material polimérico. (b) Supressor de surto e divisor de tensão.	80
4.21	Supressor de surto de ZnO. (a) Com invólucro de porcelana. (b) Sem invólucro de porcelana.	81
4.22	Suporte isolante contendo três varistores de ZnO conectados em série. . . .	82
4.23	Formas de onda médias das correntes e tensões residuais medidas em um supressor de surto de distribuição com diferentes invólucros submetidos a diferentes amplitudes de corrente.	84
5.1	Curva $V-I$ típica e modelo de supressor de surto de ZnO idealizado para região de baixas correntes.	86
5.2	Diagrama esquemático da técnica computacional utilizada na decomposição da corrente de fuga.	87
5.3	Fluxograma do método de decomposição da corrente de fuga proposto por Brito (2013).	87
5.4	Curva $V-I$ típica e modelos de supressores de surto de ZnO idealizados para região de alta não linearidade.	89
5.5	Curva $V-I$ típica e modelo de supressor de surto de ZnO idealizado para região de altas correntes.	90
5.6	Modelo elétrico proposto.	91
5.7	Curvas características da capacitância em função da tensão na região de baixas correntes.	93
5.8	Curvas características $C-V$ na região de baixas correntes com ajustes realizados nas curvas dos varistores tipo E.	94
5.9	Curvas características da capacitância média em função da tensão e classe de descarga em linha na região de baixas correntes.	94
5.10	Curvas características da tensão versus a componente resistiva da corrente de fuga na região de baixas correntes.	97
5.11	Curva característica normalizada da tensão versus a componente resistiva da corrente de fuga na região de baixas correntes.	98

5.12	Curvas características normalizadas da tensão versus a componente resistiva da corrente de fuga na região de alta não linearidade.	99
5.13	Curvas características normalizadas da tensão versus a componente resistiva da corrente de fuga na região de alta não linearidade em função da classe de descarga em linha.	100
5.14	Curva característica da componente resistiva da corrente de fuga versus tensão na região de altas correntes.	101
5.15	Curvas características da componente resistiva da corrente de fuga versus tensão na região de altas correntes em escala semi-logarítmica, com comportamento extrapolado para amplitudes de 15 a 40 kA.	102
5.16	Curva característica $V-I_r$ da resistência não linear do MEP.	103
6.1	Varistor tipo A: resultados das simulações do modelo Convencional e MEP, para quatro medições na região de baixas correntes.	111
6.2	Varistor tipo B: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.	111
6.3	Varistor tipo C: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.	112
6.4	Varistor tipo D: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.	112
6.5	Varistor tipo E: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.	113
6.6	Varistor tipo F: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.	113
6.7	Varistor tipo A: comparação do erro no valor de pico da corrente, na região de baixas correntes, fornecido pelo MEP e modelo Convencional.	115
6.8	Erro no valor de pico da corrente para cada conjunto de quatro medições, na região de baixas corrente, em cada varistor.	115
6.9	Varistor tipo A: comparação do R^2 da forma de onda da corrente, na região de baixas correntes, fornecido pelo MEP e pelo modelo Convencional.	116
6.10	Valores de R^2 para cada conjunto de quatro medições, na região de baixas correntes, em cada varistor.	116

6.11	Formas de onda do impulso de corrente 30/60 μs aplicado ao varistor A1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 250, 500, 1000 e 2000 A.	117
6.12	Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 30/60 μs	118
6.13	Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente 30/60 μs	119
6.14	Estatística R^2 para o impulso de corrente 30/60 μs	120
6.15	Formas de onda do impulso de corrente 1,5/26 μs aplicado ao varistor E1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA.	123
6.16	Formas de onda do impulso de corrente 3/6 μs aplicado ao varistor D1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA.	123
6.17	Formas de onda do impulso de corrente 4/10 μs aplicado ao varistor A1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA.	124
6.18	Formas de onda do impulso de corrente 8/20 μs aplicado ao varistor C1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA.	124
6.19	Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 1,5/26 μs	125
6.20	Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 3/6 μs	125
6.21	Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 4/10 μs	126
6.22	Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 8/20 μs	126
6.23	Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente 1,5/26 μs	128

6.24	Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente 3/6 μs	128
6.25	Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente 4/10 μs	129
6.26	Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente 8/20 μs	129
6.27	Estatística R^2 para o impulso de corrente 1,5/26 μs	130
6.28	Estatística R^2 para o impulso de corrente 3/6 μs	131
6.29	Estatística R^2 para o impulso de corrente 4/10 μs	131
6.30	Estatística R^2 para o impulso de corrente 8/20 μs	132
7.1	Diagrama Eletrogeográfico de Trecho da Rede de Alta Tensão do SIN com destaque para as LT Teresina II - P. Dutra de 500 kV.	137
7.2	Níveis de tensão na energização da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV.	137
7.3	Níveis de corrente nos supressores de surto da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV durante energização.	138
7.4	Níveis de energia nos supressores de surto da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV durante energização.	138
7.5	Níveis de tensão durante rejeição de carga na LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV.	141
7.6	Níveis de corrente nos supressores de surto da LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV durante rejeição de carga.	141
7.7	Níveis de energia nos supressores de surto da LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV durante rejeição de carga.	142
7.8	Diagrama Eletrogeográfico de Trecho da Rede de Alta Tensão do SIN.	143
7.9	Parte do circuito elétrico da subestação de Camaçari IV modelado para alta frequência.	143
7.10	Forma de onda da descarga atmosférica aplicada no lado de AT do transformador de 500/230 kV de Camaçari IV.	145
7.11	Níveis de tensão no supressor de surto e no lado de AT do transformador de 500/230 kV de Camaçari IV.	146

-
- 7.12 Níveis de tensão no lado de AT do transformador de 500/230 kV de Camargari IV com o supressor de surto conectado no lado de AT do transformador. 146

Lista de Tabelas

2.1	Correlação entre o diâmetro dos varistores da ABB e a classe de descarga em linha e corrente nominal de descarga.	17
3.1	Comparativo das contribuições de modelos de supressores de surto de ZnO propostos por diversos autores.	48
4.1	Características físicas dos varistores de ZnO.	56
4.2	Características elétricas dos varistores A1 e A2.	56
4.3	Tensões de carregamento dos capacitores para gerar diversas amplitudes do impulso de corrente 30/60 μs	64
4.4	Valores dos elementos do gerador de impulso de corrente utilizados para gerar os impulsos de corrente 1,5/26 μs , 3/6 μs , 4/10 μs e 8/20 μs	68
4.5	Tensões de carregamento dos capacitores para gerar diversas amplitudes dos impulsos de corrente 1,5/26 μs , 3/6 μs , 4/10 μs e 8/20 μs	69
4.6	Parâmetros de medição da tensão induzida.	77
4.7	Comparação entre as tensões residuais medidas em varistores de ZnO com invólucro de material polimérico, de porcelana e sem invólucro.	84
5.1	Correlação entre o diâmetro dos varistores da ABB e a classe de descarga em linha e corrente nominal de descarga.	92
5.2	Valores estimados das tensões MCOV dos varistores de ZnO ensaiados, agrupados por classe de descarga em linha.	95
5.3	Valores estimados da capacitância dos varistores de acordo com a classe de descarga em linha e altura.	96

5.4	Capacitância do supressor de surto de ZnO de acordo com a classe de descarga em linha, altura h e número n de colunas de varistores no interior do supressor de surto.	96
5.5	Característica $V-I_r$ da resistência não linear do MEP para a região de baixas correntes.	98
5.6	Característica $V-I_r$ normalizada da resistência não linear do MEP na região de alta não linearidade de acordo com a classe de descarga em linha do supressor de surto de ZnO.	100
5.7	Característica $V-I_r$ da resistência não linear do MEP para região de altas correntes.	101
5.8	Característica $V-I_r$ da resistência não linear do MEP.	103
5.9	Capacitância do supressor de surto de ZnO de acordo com a classe de descarga em linha, altura h e número n de colunas de varistores no interior do supressor de surto.	104
7.1	Principais características do supressor de surto modelado.	134
7.2	Tensões residuais do supressor de surto modelado para impulsos de corrente de manobra (30/60 μs) e atmosférica (8/20 μs).	134
7.3	Definição dos parâmetros dos elementos mostrados na Figura 7.9.	144
7.4	Valores de pico das tensões no terminal de alta tensão do transformador submetido à descarga atmosférica com amplitude de 20 kA.	147

Lista de Abreviaturas e Siglas

ATP	<i>Alternative Transient Program.</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
DHT	Distorção Harmônica Total.
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program.</i>
EPME	Erro Percentual Absoluto Médio em Relação ao Valor de Energia Absorvida.
EPMP	Erro Percentual Absoluto Médio em Relação ao Valor de Pico.
EPE	Erro Percentual em Relação ao Valor de Energia Absorvida.
EPP	Erro Percentual em Relação ao Valor de Pico.
HVDC	<i>High Voltage Direct Current.</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission.</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão.
MCOV	<i>Maximum Continuous Operating Voltage</i> (Máxima Tensão de Operação Contínua).
MEP	Modelo Elétrico Proposto.
NBI	Nível Básico de Isolamento.
SiC	Carboneto de Silício.

SSE *Sum of Squares Due to Error* (Soma dos Erros Quadráticos).

SST *Total Sum of Squares* (Soma dos Erros Quadráticos com Relação à Média).

UFCG Universidade Federal de Campina Grande.

ZnO Óxido de Zinco.

Resumo

Este trabalho propõe um modelo elétrico de supressor de surto de ZnO que o representa com exatidão nas três regiões de operação, em uma ampla faixa de frequência e amplitude. O Modelo Elétrico Proposto (MEP) foi validado a partir de um banco de dados, contendo resultados de medições de tensão e corrente. Este banco de dados é constituído por medições em doze varistores de ZnO de cinco fabricantes diferentes, com diferentes dimensões físicas e características elétricas. Nos ensaios, os varistores foram submetidos a diversos níveis de tensão na região de baixas correntes. Também foram aplicados aos varistores vários níveis de amplitude de impulsos de corrente de manobra (30/60 μs), descarga atmosférica (8/20 μs), alta corrente (4/10 μs) e impulsos de corrente com frentes de onda mais rápidas (1,5/26 μs e 3/6 μs), abordando as regiões altamente não linear e altas correntes. Adicionalmente, outros ensaios foram realizados com objetivo de verificar a presença do acoplamento indutivo e a influência do invólucro do supressor de surto na medição da tensão residual. A partir do banco de dados, foram realizadas simulações com o MEP, e com os modelos Convencional e IEEE, já consolidados no meio científico. Os resultados dos modelos foram comparados entre si, e com os resultados de medição. O MEP apresentou melhores resultados em praticamente todos os casos, nas três regiões de operação. O MEP também foi avaliado em estudos reais de energização de linha de transmissão, rejeição de carga e coordenação de isolamento. Os resultados de simulação dos estudos apresentaram níveis de amplitude condizentes com o esperado, e não apresentaram oscilações numéricas ou instabilidade. Os parâmetros do MEP são de fácil determinação, e todas as informações necessárias estão contidas nos *datasheets* dos fabricantes.

Palavras-Chave: Modelo elétrico; para-raios; supressores de surto; ensaios elétricos; impulsos de corrente; sobretensões.

Abstract

This work proposes an electric model of ZnO surge arresters that represents accurately the ZnO surge arresters in a wide range of frequencies and amplitudes. The Proposed Electric Model (PEM) was validated from a database, containing results of voltage and current measurements. This database are based in twelve ZnO varistors of five different manufacturers, with different physical dimensions and electrical characteristics. In the lab tests, the varistors were submitted to different voltage levels in the low current region. There were also applied to the varistors multilevel amplitude of switching current impulses (30/60 μs), lightning current impulses (8/20 μs), high current impulses (4/10 μs) and current impulses with very fast front time (1.5/26 μs and 3/6 μs), addressing the highly nonlinear and high current regions. In addition, other lab tests were conducted in order to verify the presence of inductive coupling and the influence of the surge arrester housing in the residual voltage measuring. From the database, simulations were performed with the PEM, with the Conventional and IEEE models which are already consolidated in the scientific community. The results of the models were compared among themselves, and with the measurement results. The PEM presented best results in practically all cases, in all three operating regions. The PEM was also evaluated in real studies of transmission line energization, load shedding and insulation coordination. The simulation results of the studies presented amplitude levels as expected and did not presented numerical oscillations or instability. The PEM parameters are easily determined, besides that all necessary information is contained in the manufacturers datasheet.

Keywords: Electric model; surge arresters; surge suppressors; electric tests; current impulses; overvoltages.

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas e Siglas	xvi
Resumo	xviii
Abstract	xix
1 Introdução	4
1.1 Motivação	5
1.2 Objetivos	10
1.3 Contribuições	11
1.4 Organização do Trabalho	12
2 Fundamentação Teórica	14
2.1 Supressores de Surto de ZnO	14
2.2 Características Construtivas do Supressor de Surto de ZnO	15
2.3 Características Elétricas dos Supressores de Surto de ZnO	17
2.4 Características Térmicas dos Supressores de Surto de ZnO	20
3 Revisão Bibliográfica	23
3.1 Modelos Elétricos Baseados na Microestrutura do Varistor	23
3.2 Modelos Empíricos de Supressores de Surto de ZnO	31
3.3 Medição da Tensão Residual	49

4	Ensaio, Medições e Análises	54
4.1	Varistores de ZnO Avaliados	55
4.2	Ensaio de Caracterização dos Varistores de ZnO na Região de Baixas Correntes	57
4.3	Ensaio de Caracterização dos Varistores de ZnO na Região de Alta Não Linearidade	61
4.4	Ensaio de Caracterização dos Varistores de ZnO na Região de Altas Correntes	67
4.5	Ensaio de Verificação do Acoplamento Indutivo e da Influência do Invólucro do Supressor de Surto de ZnO na Medição da Tensão Residual	74
4.5.1	Ensaio de Verificação do Acoplamento Indutivo	74
4.5.2	Ensaio de Verificação da Influência do Invólucro do Supressor de Surto de ZnO na Medição da Tensão Residual	79
5	Modelo Elétrico Proposto	85
5.1	Modelo Elétrico para Região de Baixas Correntes	85
5.2	Modelo Elétrico para Região Altamente Não Linear	88
5.3	Modelo Elétrico para Região de Altas Correntes	89
5.4	Modelo Elétrico Proposto	91
5.5	Resumo para Determinação dos Parâmetros do MEP	104
6	Análise do Desempenho do Modelo Elétrico Proposto	106
6.1	Introdução	107
6.2	Validação do MEP na Região de Baixas Correntes	109
6.2.1	Análises das Formas de Onda da Corrente de Fuga	110
6.2.2	Análises de Erros no Valor de Pico da Corrente de Fuga	114
6.2.3	Análises da Estatística R^2 para a Corrente de Fuga	115
6.3	Validação do MEP na Região Altamente Não Linear	117
6.3.1	Análises das Formas de Onda da Tensão Residual	117
6.3.2	Análises de Erros no Valor de Pico da Tensão Residual	118
6.3.3	Análises de Erros no Valor de Energia Absorvida	119
6.3.4	Análises da Estatística R^2 para a Tensão Residual	120
6.4	Validação do MEP na Região de Altas Correntes	121

6.4.1	Análises das Formas de Onda da Tensão Residual	121
6.4.2	Análises de Erros no Valor de Pico da Tensão Residual	124
6.4.3	Análises de Erros no Valor da Energia Absorvida	127
6.4.4	Análises da Estatística R^2 para a Tensão Residual	130
7	Estudos Sistêmicos com o Modelo Elétrico Proposto	133
7.1	Energização da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV	135
7.2	Rejeição de Carga na LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV	139
7.3	Incidência de Descarga Atmosférica com Amplitude de 20 kA no Lado de Alta Tensão do Transformador de 500/230 kV de Camaçari IV	142
8	Conclusões	148
8.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	150
	Referências	151

Capítulo 1

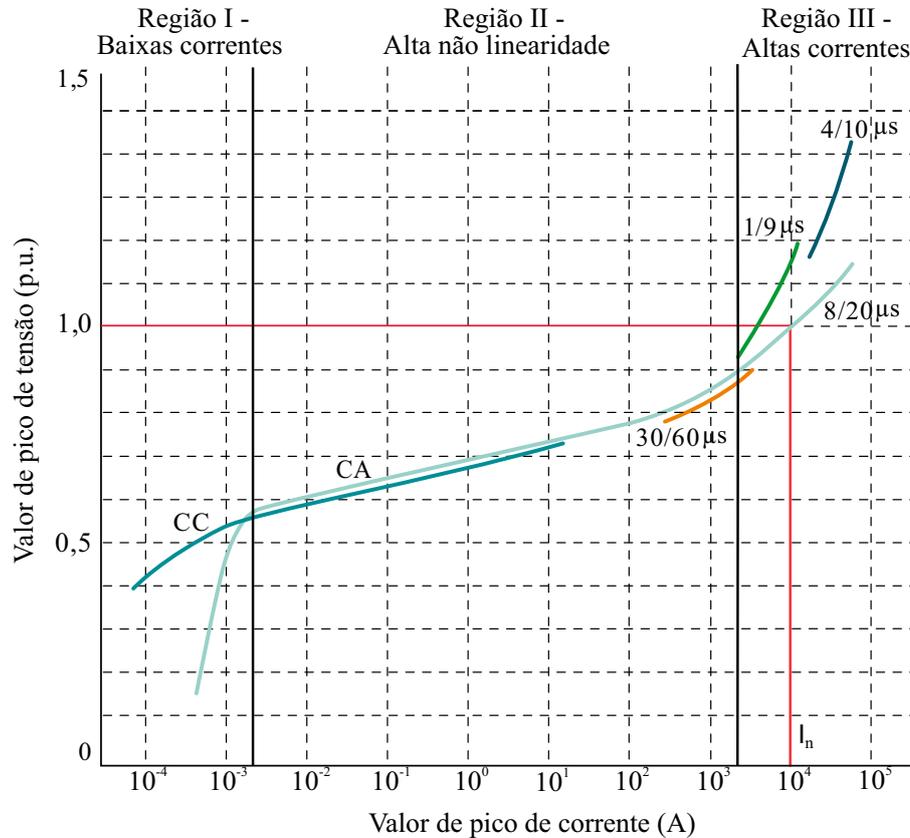
Introdução

A tradução de normas técnicas brasileiras do termo em Inglês *Surge Arrester* para para-raios não traduz a real função do equipamento que é limitar sobretensões. Dessa forma, optou-se neste trabalho por utilizar o termo supressor de surto.

Os supressores de surto à base de óxido de zinco (ZnO), também conhecidos como para-raios de ZnO, são equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos contra sobretensões atmosféricas e de manobra. Eles são constituídos principalmente por elementos não lineares, os varistores de ZnO. A característica altamente não linear desses elementos permite que o supressor de surto esteja conectado, continuamente, entre os terminais fase e terra do sistema elétrico.

Em regime normal de operação, o supressor de surto de ZnO apresenta alta impedância, conduzindo correntes na ordem de microampères. Nesta situação, o supressor de surto opera na região I da curva característica $V-I$ típica mostrada na Figura 1.1. Na ocorrência de surtos de manobra o supressor de surto de ZnO opera na região II mostrada na Figura 1.1, onde a corrente conduzida pelo supressor de surto é da ordem de dezenas ou centenas de ampères, com duração de algumas dezenas de microssegundos, sendo a capacidade de absorção de energia pelo supressor de surto o principal parâmetro a ser especificado para essa situação. Na ocorrência de surtos atmosféricos, o supressor de surto opera na região III mostrada na Figura 1.1, podendo conduzir correntes na ordem de unidades ou dezenas de quiloampères, com duração de poucos microssegundos, sendo o valor de pico da tensão residual o principal parâmetro a ser especificado, nesse caso. Esse valor depende da taxa de crescimento do impulso de corrente.

Figura 1.1 – Curvas V - I típicas de um supressor de surto de ZnO com valores de tensão normalizados pela tensão residual para o impulso de corrente $8/20 \mu\text{s}$ - 10 kA.



Fonte: Adaptada de ABB (2011).

1.1 Motivação

Os isolamentos dos equipamentos de um sistema elétrico de potência são vulneráveis a sobretensões atmosféricas, de manobra ou chaveamento, e sustentadas. Em determinadas condições, essas sobretensões danificam os equipamentos e/ou provocam a perda de continuidade do serviço. Para a proteção do sistema elétrico contra sobretensões, torna-se necessário a instalação de dispositivos supressores de surto. Eles atuam como limitadores de tensão, impedindo que sobretensões com valores acima de um determinado nível pré-estabelecido possam atingir os equipamentos protegidos.

Dentre os vários tipos de supressores de surto, os supressores à base de ZnO vêm dominando o mercado por apresentarem características superiores aos demais, tais como: ausência de centelhadores; característica tensão-corrente altamente não linear, podendo

ser instalado permanentemente no sistema elétrico; e elevada capacidade de absorção de energia (COSTA, 1999).

A análise do desempenho dos sistemas elétricos frente a surtos deve ser iniciada pela modelagem adequada de cada equipamento, considerando os aspectos transitórios inerentes ao fenômeno. Os equipamentos do sistema elétrico são geralmente modelados por elementos básicos de circuitos elétricos, ou seja, resistor, capacitor e indutor. São utilizados elementos únicos, lineares ou não lineares, ou uma associação de elementos. A escolha dos elementos e os valores atribuídos estão geralmente relacionados às características elétricas e físicas do equipamento a ser modelado e sua faixa de operação.

O supressor de surto de ZnO apresenta diferentes comportamentos elétricos para cada uma das três regiões de operação. Na ausência de sobretensões, ou seja, quando o supressor de surto está submetido à tensão de operação do sistema elétrico, a capacitância do supressor de surto é predominante (LUNDQUIST et al., 1990; IEC 60099-5, 2000; BRITO et al., 2013). Já na região intermediária, de alta não linearidade, quando o supressor de surto está submetido a sobretensões temporários ou de manobra, o comportamento resistivo é dominante (GUPTA, 1990; NIGOL, 1992). Na região de altas correntes, quando o supressor de surto é submetido a sobretensões atmosféricas ou a transitórios muito rápidos (*vary-fast transients* - VFT), há uma considerável influência da indutância do supressor de surto, cujo comportamento varia de acordo com a taxa de crescimento do impulso de corrente (TOMINAGA et al., 1979; SCHMIDT et al., 1989; HILEMAN et al., 1990; IEEE Working Group 3.4.11, 1992; KIM et al., 1996; LIRA et al., 2007b; LIRA et al., 2011; BEZERRA et al., 2014). A ampla faixa de operação associada à diversidade de comportamento elétrico do supressor de surto de ZnO dificulta a sua representação por um modelo elétrico para uso geral.

Devido à necessidade da análise do desempenho dos sistemas elétricos e da importância dos supressores de surto de ZnO como elemento limitador de surtos, diversos modelos (TOMINAGA et al., 1979; SCHMIDT et al., 1989; HILEMAN et al., 1990; IEEE Working Group 3.4.11, 1992; KIM et al., 1996; PINCETI; GIANNETTONI, 1999; ZITNIK et al., 2005; VILAR et al., 2013) vêm sendo propostos com o intuito de fornecer ferramentas para estudos de coordenação de isolamento, localização ótima, capacidade de absorção de

energia, seleção correta/especificação de supressor de surto, entre outros (MONTAÑÉS et al., 2002; ORILLE-FERNÁNDEZ et al., 2004; LIRA et al., 2007a; SHARIATINASAB et al., 2009; MOHAJERYAMI; DOOSTAN, 2016). Infelizmente, os modelos existentes foram desenvolvidos para representar o supressor de surto em situações específicas. Alguns modelos são apropriados para estudos em regime permanente, outros são indicados para estudos envolvendo sobretensões de manobra, e por fim, alguns foram desenvolvidos para estudos envolvendo descargas atmosféricas e VFT. Assim, como os estudos de sistemas de potência, normalmente, envolvem diversos tipos de situações operacionais (regime permanente, transitórios, etc), os modelos de supressores de surto de ZnO existentes podem conduzir a falhas de representação e simulação.

Além disso, a maioria dos modelos elétricos que vêm sendo propostos têm seus parâmetros determinados, apenas, a partir de ensaios elétricos com aplicação de impulsos de corrente normatizados, como, por exemplo, com forma de onda 8/20 μ s e amplitude de 10 kA (HILEMAN et al., 1990; IEEE Working Group 3.4.11, 1992; KIM et al., 1996; ZITNIK et al., 2005; TRIRUTTANAPIRUK; YURTHAGOWITH, 2014). Essa particularização faz com que os modelos funcionem de forma otimizada para os sinais utilizados nos ajustes dos parâmetros, mas sejam considerados imprecisos para outros sinais (BEZERRA et al., 2014). Isto ocorre porque a tensão residual depende da taxa de crescimento do impulso de corrente, e não apenas de sua amplitude. Ainda neste contexto, os modelos utilizados geralmente representam apenas a região de altas correntes, e nesta região particularizam os surtos atmosféricos, negligenciando os surtos de manobra, cuja capacidade de absorção de energia pelo supressor de surto é um fator crítico.

A maioria dos modelos que vêm sendo utilizados não representam as características elétricas do supressor de surto de ZnO nas regiões de baixas correntes e alta não linearidade. Caso esses modelos sejam empregados em simulações na região de baixas correntes, a corrente de fuga fornecida pelos modelos é geralmente, muito superior à corrente conduzida pelo supressor de surto real. Além disso, as distorções harmônicas e a predominância da componente capacitiva da corrente de fuga não são comumente representadas. Se esses modelos forem empregados na região altamente não linear, a energia absorvida pelo supressor de surto pode ser muito superior ao valor real. Ambas as situações caracterizam

a representação incorreta do supressor de surto, e fazem com que o modelo elétrico do supressor de surto interfira no comportamento normal do sistema elétrico simulado, podendo implicar em erros na especificação dos equipamentos elétricos e do próprio supressor de surto.

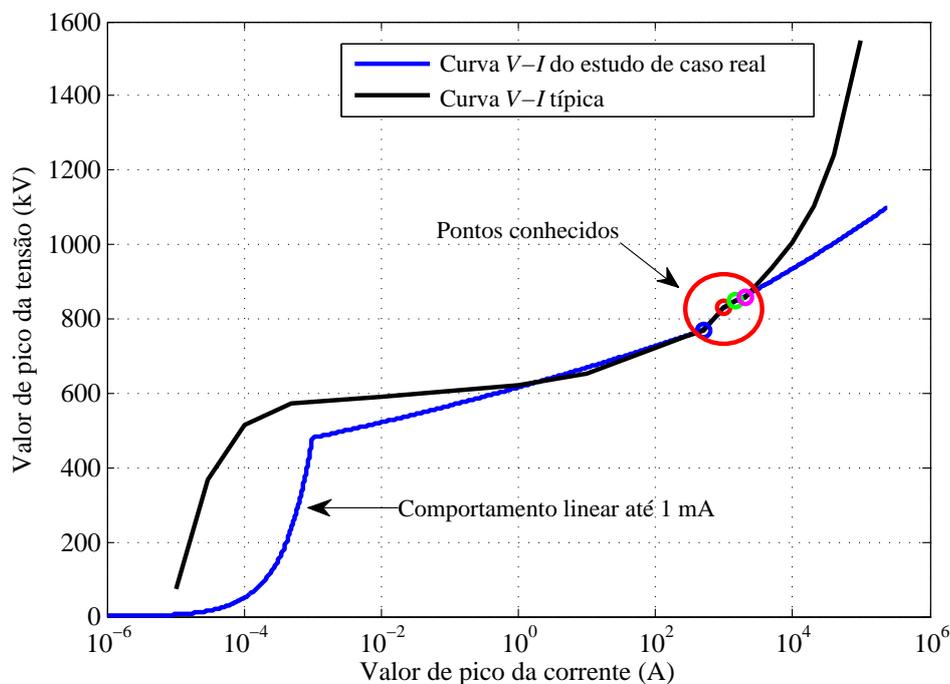
Com objetivo de exemplificar o problema de uma incorreta representação do supressor de surto de ZnO, foram realizadas simulações computacionais de um estudo de caso real de rejeição de carga em um sistema elétrico de 500 kV. O *software* utilizado nas simulações foi o ATP (*Alternative Transient Program*) e o supressor de surto de ZnO foi representado pelo modelo Convencional (resistência não linear).

No *software* ATP foi utilizado o modelo 92 - 5555 para representar a curva $V-I$ do supressor de surto. Foram realizadas duas simulações. Na primeira, foram utilizados os pontos da curva $V-I$ do supressor de surto fornecidos pela concessionária de energia e na segunda os pontos de uma curva $V-I$ típica. Na Figura 1.2 são apresentadas as duas curvas. A concessionária de energia utiliza apenas quatro pontos para representar a curva $V-I$ em estudos envolvendo sobretensões de manobra, como no caso de rejeição de carga. Os pontos utilizados pela concessionária de energia estão identificados na Figura 1.2. Os demais pontos da curva $V-I$ são fornecidos pelo modelo 92 - 5555 com base em uma equação de potência, cujos parâmetros dependem dos pontos $V-I$ inseridos. A diferença de comportamento da curva $V-I$ utilizada pela concessionária de energia até a corrente de 1 mA, deve-se ao fato de ser ajustado pela concessionária de energia, no modelo 92 - 5555, um comportamento linear até esse valor. Este procedimento foi adotado pela concessionária para evitar erros de representação numérica (*overflow*), durante a potenciação. Já a curva $V-I$ típica possui quinze pontos, incluindo os pontos fornecidos pela concessionária de energia.

O supressor de surto em análise possui capacidade de absorção de energia de 6468 kJ. Utilizando a curva $V-I$ fornecida pela concessionária de energia, o valor de energia no supressor de surto foi de 6600 kJ, ou seja, houve superação de energia pelo supressor de surto. No caso de utilizar a curva $V-I$ típica, o valor de energia é reduzido para 5200 kJ, não havendo superação de energia. Portanto, fica evidente a necessidade de um modelo de supressor de surto que represente com fidelidade a sua característica elétrica. Outra

observação importante é que mesmo que o supressor de surto seja avaliado em apenas uma região de operação, faz-se necessário a sua representação nas três regiões de operação.

Figura 1.2 – Curva $V-I$ de supressor do surto utilizado em um estudo de caso real modelado de duas formas diferente.



Fonte: Produzida pelo autor.

Assim, um modelo ideal, amplo e completo, deve:

- representar o supressor de surto de ZnO nas três regiões de operação;
- apresentar acurácia nos resultados de simulação;
- minimizar a ocorrência de oscilações numéricas;
- representar o comportamento médio dos supressores de surto de diversas dimensões, classes de tensão e capacidade de absorção de energia;
- ser de fácil determinação dos parâmetros, sendo todos os dados básicos encontrados facilmente no *datasheet* do fabricante.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo elétrico de supressor de surto de óxido de zinco, que o represente em uma ampla faixa de operação, sem restrição de uso em regiões de operação.

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos também devem ser alcançados:

- desenvolver o modelo a partir de dados de medição, utilizando blocos de ZnO com diferentes dimensões, classes de tensão, capacidade de absorção de energia e de diferentes fabricantes, de forma a representar o comportamento elétrico médio dos supressores de surto de ZnO;
- tornar fácil a determinação dos parâmetros do modelo, sendo todos os dados básicos encontrados facilmente no *datasheet* do fabricante;
- minimizar a ocorrência de oscilações numéricas espúrias durante a simulação do modelo. As oscilações podem ocorrer devido alguns *softwares* utilizarem a regra de integração trapezoidal como método de solução numérica;
- representar a região de baixas correntes a partir dos resultados de ensaios elétricos em frequência industrial;
- representar a região altamente não linear, a partir dos resultados de ensaios elétricos, utilizando impulsos de corrente de manobra normatizados, 30/60 μs , com amplitudes de 250 a 2000 A. Os valores utilizados são típicos de amplitudes de corrente nos supressores de surto quando submetidos a sobretensões de manobra.
- representar a região de altas correntes a partir dos resultados de ensaios elétricos, utilizando impulsos de corrente com tempos de frente entre 1 e 8 μs , com amplitudes de 4 a 15 kA. As amplitudes e as formas de onda escolhidas representam os impulsos de corrente típicos conduzidos pelos supressores de surto quando submetidos a sobretensões atmosféricas.

Além dos objetivos específicos citados acima, torna-se necessário validar o modelo pela análise comparativa entre os sinais de tensão medidos e fornecidos pelo modelo, quando submetido a diferentes formas de onda e amplitudes de corrente. Para maior consistência dos resultados obtidos, comparações serão feitas com base nos resultados de modelos amplamente divulgados no meio científico.

1.3 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é a proposição de um modelo elétrico de supressor de surto de ZnO, baseado em dados de medição de vários blocos de ZnO nas três regiões de operação, que tem como finalidade representá-lo com exatidão em uma ampla faixa de operação. Outras contribuições derivadas desta são:

- resultados de simulação indicaram a necessidade de representar corretamente as três regiões de operação, mesmo que o modelo seja utilizado para representar o supressor de surto em apenas uma região de operação. Isto se faz necessário porque o supressor de surto de ZnO está conectado continuamente ao sistema elétrico, e para atingir a terceira região, por exemplo, ele opera, obrigatoriamente, na primeira e segunda região. Resultados de simulação, apresentados na Seção 1.1 evidenciam o problema;
- resultados experimentais constataram a necessidade de modificar a curva característica $V-I$ na região de alta não linearidade em função da classe de descarga em linha do supressor de surto. Os modelos elétricos existentes geralmente utilizam resistências não lineares com apenas uma curva $V-I$ média, e desconsideram o deslocamento da curva $V-I$ na região de alta não linearidade em função da classe de descarga em linha do supressor de surto;
- resultados experimentais evidenciaram a presença de significativas tensões induzidas, adicionadas à medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO devido ao acoplamento indutivo existente entre o objeto de teste (supressor de surto) e o instrumento de medição (divisor de tensão), não somente para frentes de onda rápida (em torno de $1 \mu s$), conforme as normas técnicas IEC 60099-4 (2014) e IEEE

C62.11 (2012) indicam ser importantes, mas também para frentes de onda mais lentas, como $8/20 \mu\text{s}$ e $4/10 \mu\text{s}$. Devendo, portanto, também serem avaliadas a necessidade de compensação das tensões induzidas no sistema de medição;

- resultados experimentais constataram a significativa influência do invólucro de porcelana ou material polimérico do supressor de surto no valor de pico da tensão residual. Os parâmetros dos modelos são ajustados com base em dados fornecidos pelos fabricantes dos supressores de surto. Caso os fabricantes não considerem as capacitâncias do invólucro de porcelana em seus ensaios, resultados experimentais apresentados neste trabalho, evidenciaram a ocorrência de erros de até 35% no valor de pico da tensão residual.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em oito capítulos. No Capítulo 2, é apresentada uma fundamentação teórica sobre os supressores de surto e suas principais características físicas, elétricas e térmicas.

No Capítulo 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre modelos de supressores de surto de ZnO, elétricos e matemáticos. Além disso, são apresentados os procedimentos necessários à correta medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO.

No Capítulo 4, são apresentados os materiais, procedimentos e arranjos experimentais necessários para geração da base de dados, utilizada na construção e validação do Modelo Elétrico Proposto (MEP). Além disso, são apresentados resultados preliminares de ensaios que visam avaliar os níveis de tensões induzidas nas proximidades dos supressores de surto quando submetidos a descargas atmosféricas, bem como avaliar a influência do tipo de invólucro do supressor de surto na medição da tensão residual.

No Capítulo 5, é apresentada a metodologia adotada para o desenvolvimento do MEP, com aplicação em uma ampla faixa de operação do supressor de surto de ZnO. O modelo é baseado em dados de medição de doze varistores de ZnO de cinco diferentes fabricantes, com diferentes dimensões físicas e características elétricas.

No Capítulo 6, são apresentadas as análises do desempenho do MEP operando nas três regiões da curva característica $V-I$ do supressor de surto de ZnO. Também são apresentadas as comparações dos resultados do MEP com os resultados fornecidos pelos modelos Convencional e IEEE.

No Capítulo 7, são apresentados os resultados de simulação do MEP em três estudos sistêmicos reais de 500 kV. Os dois primeiros estudos envolvem sobretensões de manobra: energização de linha de transmissão e rejeição de carga. O último, coordenação de isolamento: incidência de descarga atmosférica no terminal de alta tensão do transformador de 500 kV/230 kV.

Por fim, no Capítulo 8, apresentam-se as conclusões do trabalho, além das perspectivas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo, é apresentado um breve histórico sobre os supressores de surto de ZnO e suas principais características físicas, elétricas e térmicas. O conhecimento dessas características fundamenta a proposição do modelo de supressor de surto de ZnO, bem como fornece os conhecimentos necessários para avaliar se a resposta do modelo condiz com o esperado.

2.1 Supressores de Surto de ZnO

Os supressores de surto de ZnO são dispositivos essenciais na proteção de equipamentos dos sistemas elétricos, principalmente contra sobretensões atmosféricas e de manobra. Sua função é limitar as sobretensões citadas a níveis que possam ser suportados pelos isolamentos elétricos dos equipamentos que ele protege.

Em 1976 surgiram as primeiras aplicações de varistores de óxido de zinco (ZnO) nos sistemas elétricos de potência, elemento não linear, capaz de suportar a tensão do sistema sem a necessidade de centelhadores em série (SAKSHAUG, 1991). Os supressores de surto de ZnO apresentam como principais vantagens em relação ao seu antecessor, supressores de surto de carboneto de silício (SiC) (PEREIRA, 1985; COSTA, 1999):

- simplicidade na construção, aumentando a confiabilidade;
- o nível de proteção é mais bem definido por causa da ausência de *gaps*;
- melhor desempenho sob contaminação;

- maior capacidade de absorção de energia;
- possibilidade de dividir a energia entre os diversos supressores de surto instalados na subestação;
- entra e sai do estado de condução suavemente.

Os supressores de surto de ZnO são os mais utilizados atualmente em sistemas elétricos de potência. Apesar deles surgirem em meados da década de 70, as suas características físicas, e os comportamentos elétricos e térmicos frente a surtos ainda não são totalmente compreendidos, e por isso são objetos de estudos de muitos pesquisadores. Nas seções seguintes será apresentado um breve resumo sobre as características construtivas, elétricas e térmicas do supressor de surto de ZnO.

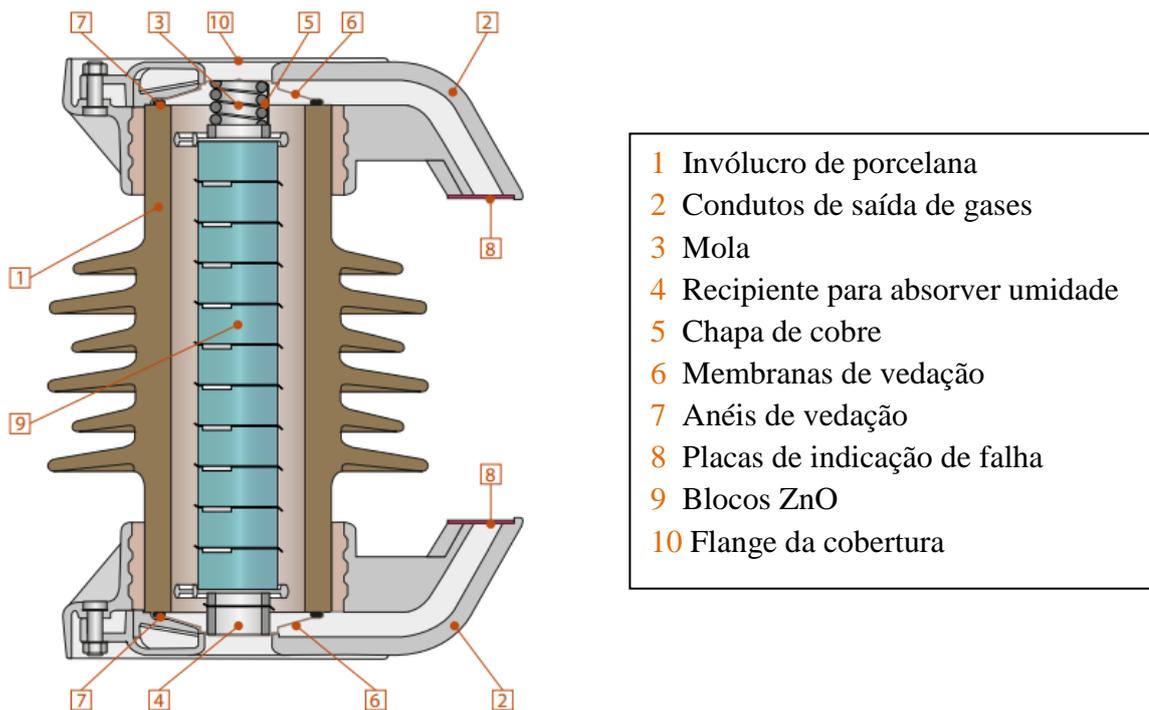
2.2 Características Construtivas do Supressor de Surto de ZnO

Os supressores de surto a óxido de zinco são equipamentos de estrutura simples. Basicamente são constituídos de uma coluna (ou colunas em paralelo) de varistores envolvida por um invólucro de porcelana ou material polimérico, havendo ainda alguns outros componentes estruturais. Sua configuração depende do sistema ao qual será aplicado, mas no aspecto geral é como mostrada na Figura 2.1.

O principal elemento de um supressor de surto de ZnO é o varistor ou bloco de ZnO, que apresenta alta não linearidade entre tensão e corrente. Ele corresponde a uma estrutura cilíndrica cujo diâmetro varia de 30 mm até 100 mm ou mais, e a altura geralmente varia entre 20 mm e 46 mm (HINRICHSEN, 2011; ABB, 2011). Para aplicações especiais, o varistor pode possuir alturas muito pequenas, como 0,8 mm (ABB, 2011). O diâmetro do varistor determina a corrente que ele conduz. A altura do varistor (ou coluna de varistores) determina a tensão de operação contínua e o volume a capacidade de absorção de energia (ABB, 2011). A altura do varistor geralmente é limitada pela homogeneidade dos grãos de ZnO – quanto maiores as dimensões do varistor mais difícil conseguir uma boa homogeneidade na distribuição interna do óxido de zinco (HINRICHSEN, 2011). Na Figura 2.2 é mostrado um conjunto de varistores com diversas dimensões.

De acordo com o catálogo da empresa ABB (ABB, 2011), o diâmetro dos varistores pode ser correlacionado com a classe de descarga em linha presente na norma (IEC 60099-4, 2004). Os valores de corrente e energia para os ensaios de tipo em supressores de surto de ZnO dependem diretamente da classe de descarga em linha e corrente nominal de descarga (ABB, 2011). Na Tabela 2.1 é mostrada a correlação entre o diâmetro dos varistores da ABB e a classe de descarga em linha e corrente nominal de descarga. Na Tabela 2.1, W' com os valores em negrito refere-se à energia para dois impulsos de corrente de longa duração; U_c é o valor da tensão de operação contínua; o valor de energia específico W'_{hc} é para um impulso de corrente predeterminado I_d , exemplo, alta corrente com forma de onda 4/10 μs .

Figura 2.1 – Configuração de um supressor de surto de ZnO com invólucro de porcelana.



Fonte: Adaptada de ABB (2014).

O varistor de ZnO é constituído por um material policristalino composto por grãos de ZnO com tamanho de 5–20 μm , contornados por uma fina camada de materiais intergranulares de aproximadamente 0,2 μm de espessura (Figura 2.3). A natureza e composição dessas camadas dependem dos aditivos utilizados na dopagem. Resultados de medições

em escalas nanométricas mostraram que as camadas intergranulares podem ser muito finas, podendo medir 2×10^{-10} m (2 ångström (Å)) (HADDAD; WARNE, 2004).

Figura 2.2 – Varistores com diâmetros e alturas diferentes.



Fonte: (HINRICHSEN, 2011).

Tabela 2.1 – Correlação entre o diâmetro dos varistores da ABB e a classe de descarga em linha e corrente nominal de descarga.

Classe de descarga em linha	-/-*	1	2	2	3	4	5
Corrente nominal de descarga I_n (kA)	5	10	10	10	10	20	20
Impulso de alta corrente I_{hc} (kA)	65	100	100	100	100	100	100
Impulso de corrente de manobra I_{sw} (A)	-/-**	125/500	125/500	125/500	250/1000	500/2000	500/2000
Ensaio de ciclo de operação, realizado com	$1 \times I_{hc}$	$1 \times I_{hc}$	$2 \times I_d^{***}$	$2 \times I_d$	$2 \times I_d$	$2 \times I_d$	$2 \times I_d$
W' em kJ/kV U_c	2,6	3,0	5,2	5,5	9,0	13,3	21,0
W'_{hc} em kJ/kV U_c	2,1	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,0
Onda quadrada I_{rw} , 2 ms (A)	250	250	500	550	1000	1350	2700
Diâmetro do varistor (mm)	38	38	42	47	62	75	108

*Sem classe de descarga em linha. **Não especificada na IEC 60099-4.

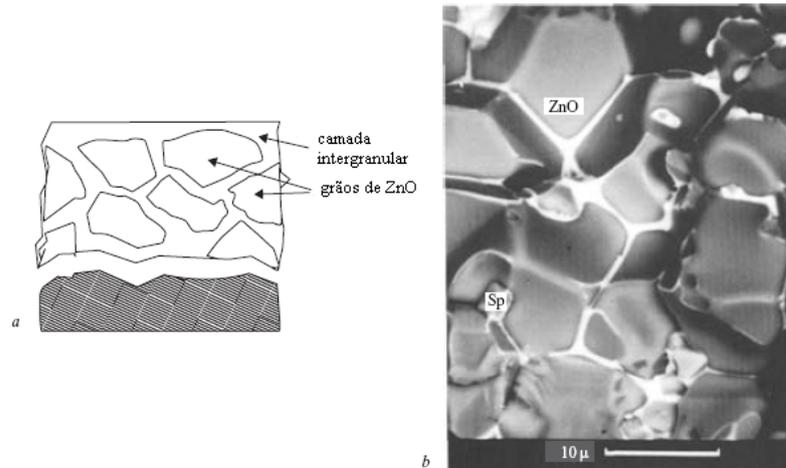
***Impulso de corrente predeterminado, exemplo, 4/10 μ s.

Fonte: Adaptada de ABB (2011).

2.3 Características Elétricas dos Supressores de Surto de ZnO

A principal característica do supressor de surto de ZnO é a alta não linearidade da curva $V-I$. Esta característica representou um avanço em relação aos supressores de surto

Figura 2.3 – Varistor de ZnO. (a) Representação esquemática da microestrutura. (b) Estrutura microscópica típica a partir da microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Adaptada de Haddad e Warne (2004).

convencionais de carboneto de silício, pois dispensou o uso de centelhadores em série com a coluna de elementos varistores.

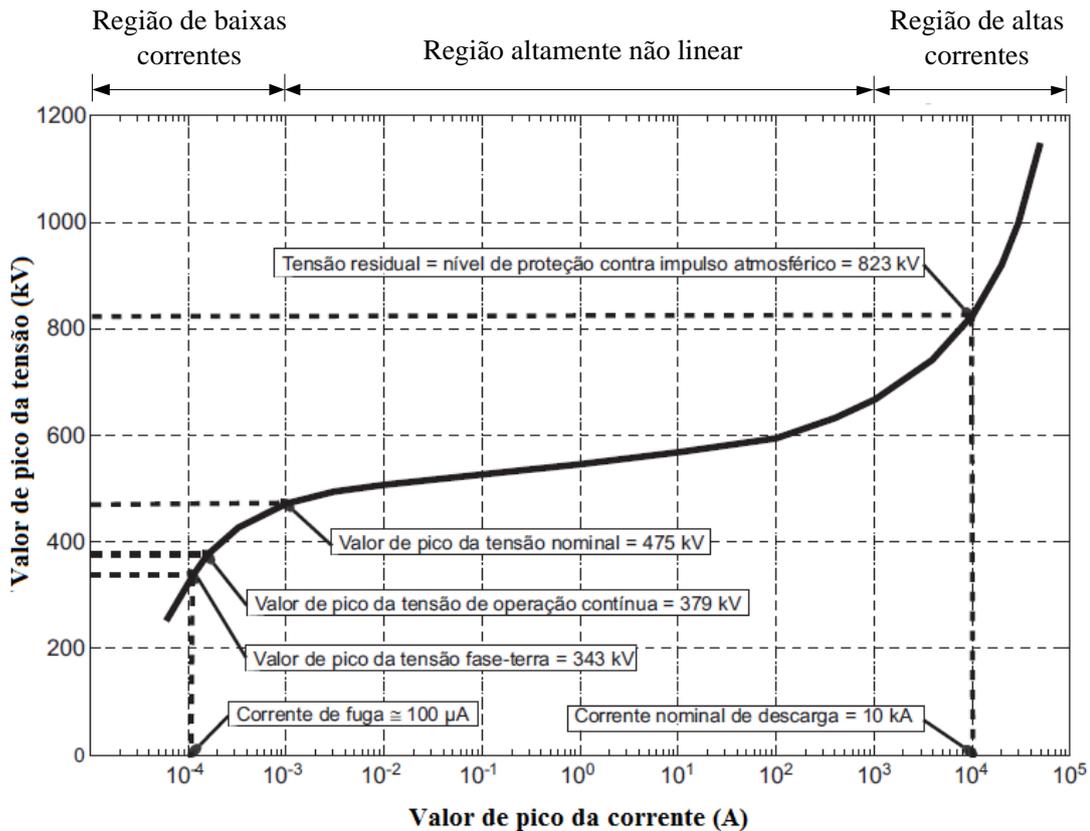
Uma curva característica típica de um supressor de surto de ZnO pode ser vista na Figura 2.4, em que são destacadas as suas regiões e os principais pontos de operação. Na primeira região da curva $V-I$ tem-se a região de baixas correntes, na qual o supressor de surto opera em regime permanente. A curva característica, nesta região, apresenta-se como uma função de comportamento aproximadamente linear, conforme descrito por (PHILIPP; LEVINSON, 1977).

Como o supressor de surto de ZnO dispensa o uso de centelhadores em série, haverá sempre a presença de uma corrente de fuga devido à formação de um caminho de condução permanente entre o sistema elétrico e a terra. Esta corrente é constituída de uma componente capacitiva e uma pequena corrente resistiva, da ordem de $55 \mu\text{A}$, enquanto que a corrente de fuga total apresenta um pico da ordem de miliampères (HINRICHSEN, 2011). Sendo assim, nessa região os supressores de surto de ZnO apresentam um comportamento predominantemente capacitivo (FRANCO, 1993; ZHAO et al., 2005; BRITO et al., 2013).

A próxima região da curva $V-I$ é a de alta não linearidade, em que o supressor de surto conduz uma corrente elevada, mesmo para pequenas variações de tensão. O pri-

meiro ponto de interesse é o valor da tensão nominal. Apesar do que o nome possa sugerir, a tensão nominal do supressor de surto não representa a tensão que pode ser aplicada continuamente sobre o mesmo, e sim aquela que pode ser aplicada temporariamente (geralmente por um período de 10 s) sem causar danos ao supressor de surto (IEC 60099-4, 2014). Dessa forma, consegue-se avaliar a capacidade do supressor de surto de lidar com sobretensões temporárias (HINRICHSEN, 2011). O valor da tensão nominal do supressor de surto está situado geralmente entre 1,17 e 1,33 vezes o valor da sua máxima tensão de operação contínua (IEEE C62.22, 2009). É nessa região que, normalmente, o supressor de surto opera diante de sobretensões lentas e apresenta um comportamento predominantemente resistivo.

Figura 2.4 – Curva V - I típica de um supressor de surto de ZnO utilizado em um sistema de 420 kV.



Fonte: Adaptada de HINRICHSEN (2011).

A terceira região caracterizada por altas correntes está diretamente relacionada ao nível de proteção oferecido pelo supressor de surto. Ela apresenta comportamento quase

linear e é caracterizada pela proteção contra impulsos atmosféricos, representando a queda de tensão no supressor de surto quando uma descarga de corrente nominal (impulso de corrente com forma de onda 8/20 μ s e amplitude de 10 ou 20 kA) é aplicada a seus terminais. Nesta região os supressores de surto de ZnO apresentam um comportamento predominantemente indutivo e um efeito dinâmico, em que a tensão residual mostra-se maior para frentes de onda mais rápidas (TOMINAGA et al., 1979; IEEE Working Group 3.4.11, 1992; KIM et al., 1996).

As diferentes características elétricas do supressor de surto de ZnO, de acordo com a região de operação, sugerem o uso de um modelo elétrico com elementos de circuito R , L e C . Na região de baixas correntes predomina a característica da capacitância. Na região de alta não linearidade a predominância é da resistência não linear. Na presença de surtos de manobra, devido a valores elevados de transitórios de corrente (elevado di/dt), a indutância do supressor de surto também deve ser considerada no modelo. Para a região de altas correntes, tem-se as características resistivas e indutivas relevantes, sendo também necessária a representação do efeito dinâmico.

2.4 Características Térmicas dos Supressores de Surto de ZnO

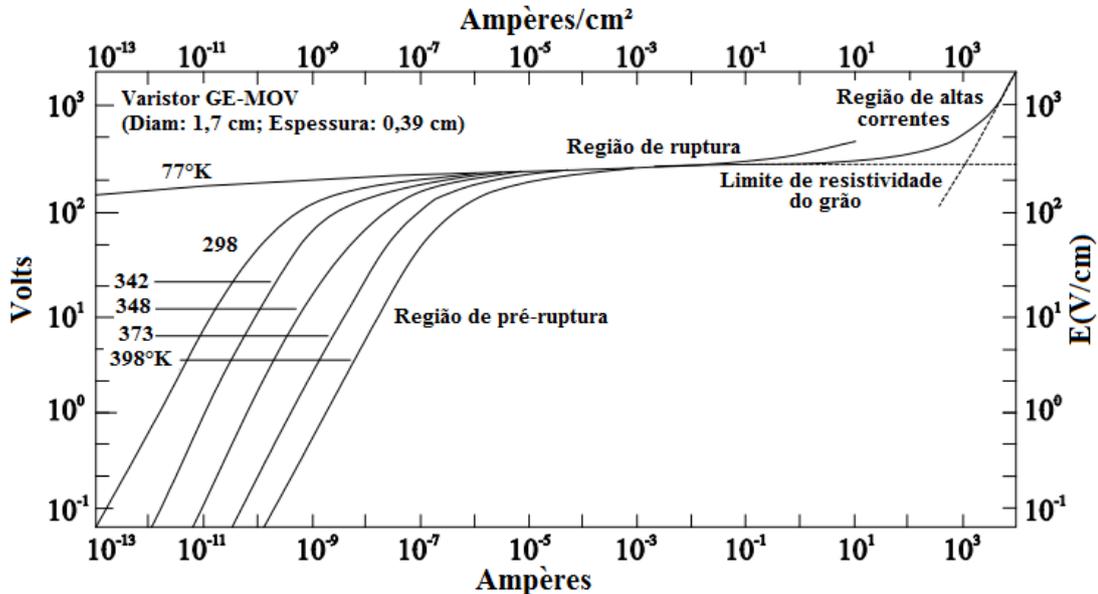
Philipp e Levinson (1977) definiram uma equação que relaciona a corrente e a temperatura do supressor de surto na região de pré-ruptura, ou seja, a primeira parte da curva $V-I$. Esta equação relaciona a dependência da temperatura com a energia de ativação (energia necessária para o deslocamento dos elétrons entre as camadas do átomo), e é dada por:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{-e_\varphi}{K_b T}\right), \quad (2.1)$$

em que, e_φ é a energia de ativação; I_0 é a corrente à temperatura de zero Kelvin; K_b é a constante de Boltzman e T é a temperatura em Kelvin. O valor aproximado da energia de ativação para diferentes temperaturas pode ser determinado utilizando a curva característica $V-I$ do supressor de surto para cada uma destas temperaturas. Na Figura 2.5 é

observada a variação da curva característica em função da temperatura.

Figura 2.5 – Características da densidade de corrente versus campo elétrico de um varistor com a temperatura.



Fonte: Adaptada de Philipp e Levinson (1977).

Nota-se que a curva característica na região de pré-ruptura é fortemente influenciada pela temperatura. No entanto, nas regiões de alta não linearidade (ruptura) e altas correntes, a temperatura não influencia a curva característica. Uma das características mais desejadas de um varistor de ZnO é a estabilidade térmica.

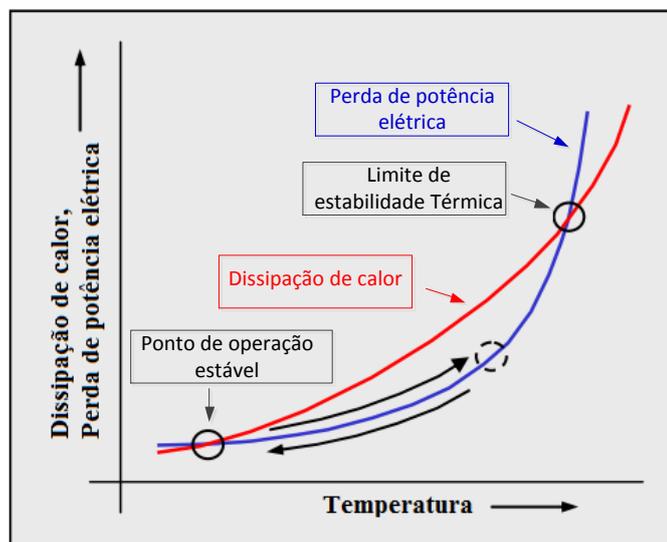
Um varistor é considerado estável termicamente quando, após a ocorrência de um surto, ele retorna às suas condições normais, ou seja, aquelas nas quais ele se encontrava antes da ocorrência do surto e quando consegue manter estas características durante o regime de operação contínua. O supressor de surto deve ter capacidade de absorver e dissipar a energia para o ambiente sem causar excessivo aumento de temperatura durante: a sua operação normal, em meio a surtos atmosféricos e de manobra e a sobretensões temporárias de curta duração (CARLSON et al., 1986; GUPTA, 1990).

Em regime de operação contínuo, uma pequena corrente de fuga é conduzida pelo supressor de surto. Esta corrente provoca um aquecimento nos varistores devido ao efeito Joule, o qual é dissipado numa taxa que não permite o aumento excessivo na temperatura dos varistores. Desta forma, o supressor de surto encontra-se em equilíbrio térmico.

Na ocorrência de sobretensões ou surtos, a corrente que percorre os elementos de óxido de zinco aumenta, o que implica no aumento de energia absorvida pelo supressor de surto e, conseqüentemente, aumento de temperatura. De forma simplificada, o comportamento térmico do supressor de surto pode ser analisado por meio das curvas de estabilidade térmica mostrada na Figura 2.6. O supressor de surto deve suportar o aumento de temperatura durante sobretensões temporárias de curta duração ou a ocorrência de surtos isolados, voltando a sua condição de operação normal sem aquecimento excessivo.

Se a sobretensão perdurar por um tempo mais longo, ou no caso da ocorrência de surtos, se vierem a ocorrer surtos subsequentes, os varistores tendem a sofrer um aquecimento maior, chegando ao ponto em que a entrada de energia é superior à capacidade de dissipação do mesmo. Neste caso, o supressor de surto entra num processo contínuo de elevação de temperatura e corrente de fuga, denominado avalanche térmica, o qual pode causar a sua destruição.

Figura 2.6 – Curva de estabilidade térmica do supressor de surto de ZnO.



Fonte: Adaptada de HINRICHSEN (2011).

As características físicas, elétricas e térmicas dos supressores surto de ZnO apresentadas neste capítulo servirão de base para análise dos modelos de supressores de surto apresentados no próximo capítulo, bem como do modelo elétrico proposto.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os principais modelos de supressores de surto de ZnO. Além disso, são retratados os cuidados necessários para correta medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO. A apresentação dos modelos de supressores de surto está dividida em duas partes. A primeira parte, nos modelos baseados na microestrutura do varistor, e a segunda nos modelos empíricos.

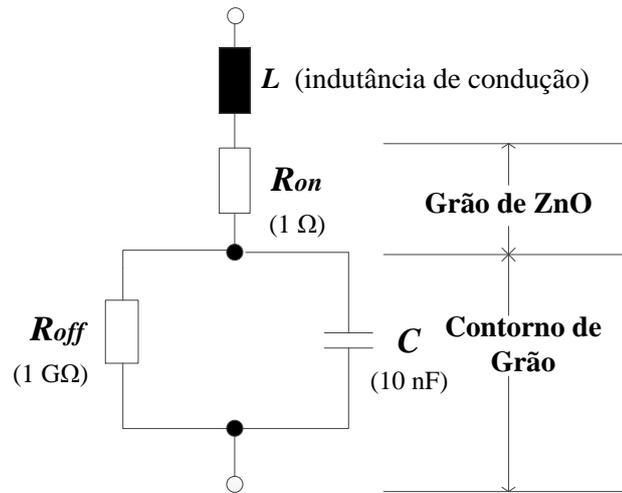
3.1 Modelos Elétricos Baseados na Microestrutura do Varistor

Os modelos elétricos baseados na microestrutura do varistor de ZnO buscam representar os grãos de ZnO e as camadas intergranulares. Os grãos de ZnO são elementos de baixa resistência, e as camadas intergranulares são as responsáveis pela não linearidade entre tensão e corrente. A camada intergranular comporta-se como uma barreira de potencial, que diminui à medida que a tensão aumenta. Os modelos elétricos baseados na microestrutura do varistor de ZnO geralmente são construídos com base em medições de tensão e corrente na região de baixas correntes, e portanto, em sua grande maioria, representam apenas essa região.

Harnden et al. (1972) propuseram um circuito elétrico (R , L , C) para o varistor de ZnO, cujos parâmetros estão relacionados às características da microestrutura do varistor. Eles atribuíram a indutância L ao efeito indutivo proporcionado pela condução de corrente. Na Figura 3.1 é visualizado o circuito elétrico. De acordo com os autores, a resistência associada à região de baixas correntes, R_{off} , é devido à resistividade do varistor

na fase intergranular, e C a capacitância atribuída à fina camada intergranular separada por elementos de alta condutividade, os grãos de ZnO. A resistência associada à região de altas correntes, R_{on} , é devido à resistividade intrínseca dos grãos de óxido de zinco. Os valores dos parâmetros mostrados na Figura 3.1 são típicos de um varistor comercial utilizado em dispositivos eletrônicos, cuja faixa de tensão está entre 140 V e 1400 V de pico.

Figura 3.1 – Modelo proposto por Harnden et al. (1972).



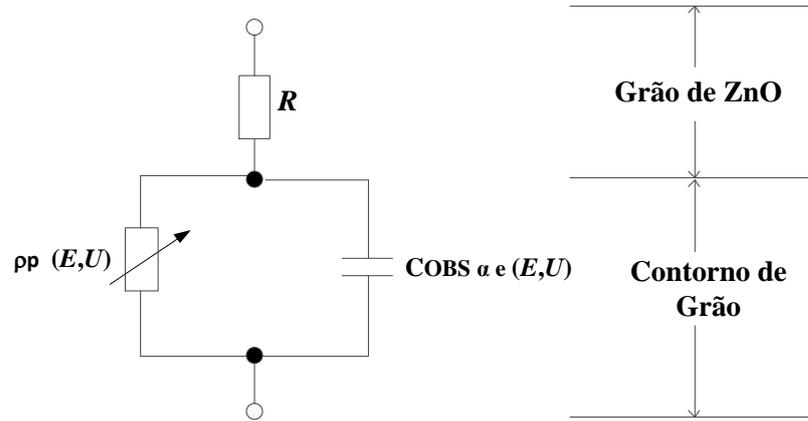
Fonte: Adaptada de Harnden et al. (1972).

Levinson e Philipp (1975) propuseram um circuito composto por uma resistência R em série com uma resistência não linear e capacitância em paralelo (Figura 3.2) para representar o varistor de ZnO. De acordo com os autores, a resistência R é equivalente à resistência dos grãos de óxido de zinco na microestrutura do varistor. A resistência de resistividade $\rho_p(E, U)$ não linear e a capacitância C_{OBS} foram adicionadas para reproduzir as características elétricas associadas à camada intergranular e representar as componentes resistiva e capacitiva da corrente de fuga na região de baixas correntes, respectivamente. A resistência não linear e a capacitância devem ser determinadas conhecendo-se valores da frequência da tensão aplicada (U) e do campo elétrico (E).

Como visto, o modelo não representa o comportamento do varistor na região de altas correntes, pois nessa região o varistor apresenta um comportamento indutivo. Devido a isso, Levinson e Philipp (1976), após estudarem o comportamento do varistor de ZnO

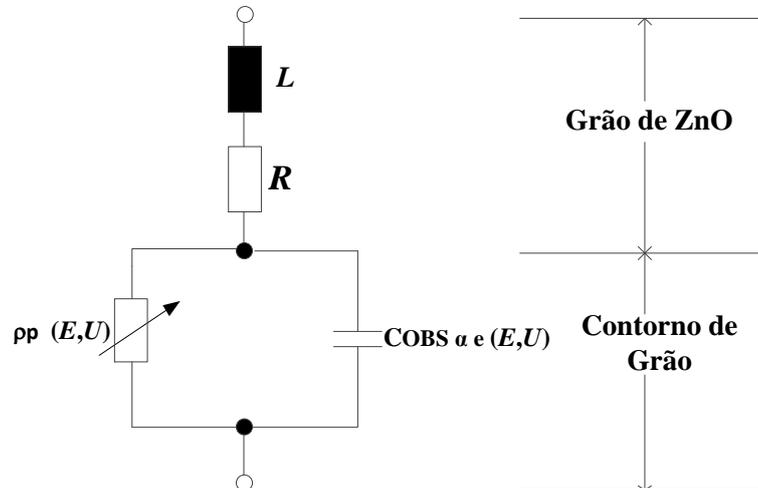
frente a altas frequências e altas correntes, incluíram em seu modelo anterior uma indutância em série utilizada para representar o efeito indutivo. A indutância L , mostrada na Figura 3.3, é associada à corrente conduzida pelo varistor.

Figura 3.2 – Modelo proposto por Levinson e Philipp (1975).



Fonte: Adaptada de Levinson e Philipp (1975).

Figura 3.3 – Modelo proposto por Levinson e Philipp (1976).

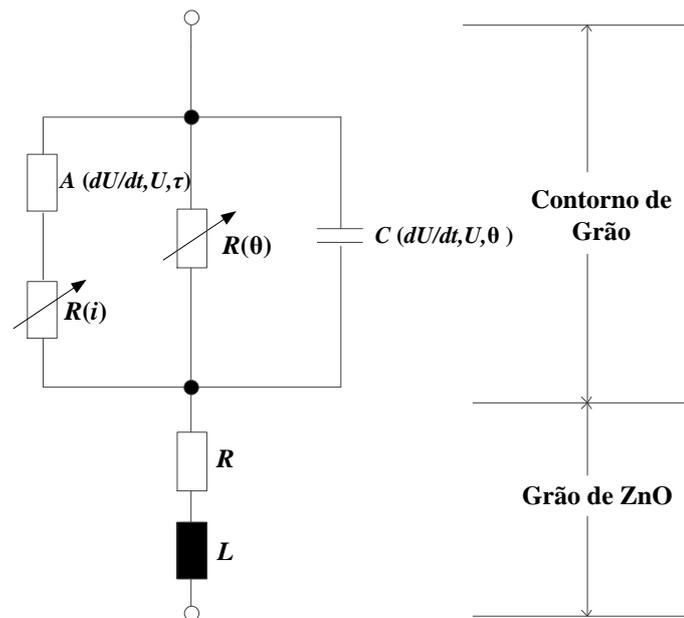


Fonte: Adaptada de Levinson e Philipp (1976).

Schmidt et al. (1989) propuseram o circuito equivalente de supressores de surto de ZnO mostrado na Figura 3.4. Como mostrado na figura, a resistência, R , e indutância, L , estão relacionadas aos grãos de ZnO e os outros elementos da figura estão relacionados com a região intergranular.

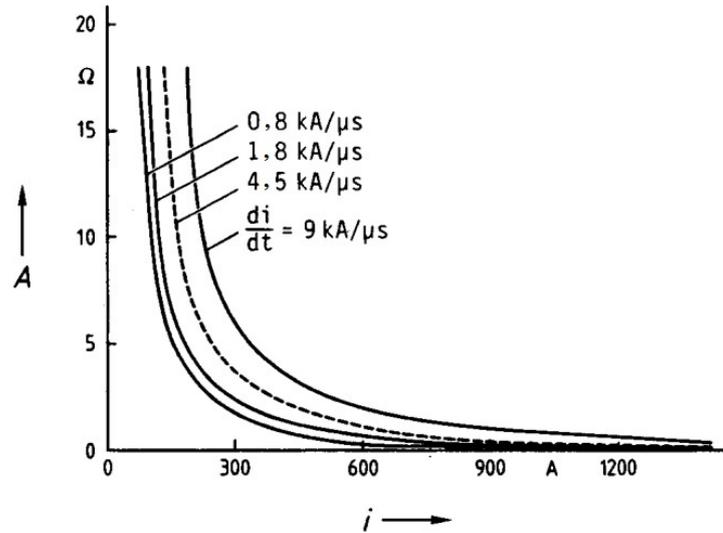
Para os autores, a tensão no elemento A reflete a distribuição dinâmica de cargas no contorno do grão de ZnO, com o seu comportamento dinâmico dependendo da forma de onda da tensão, tempo de frente e valor de pico (dU/dt , U), e da constante de tempo τ . A constante corresponde ao tempo necessário ao equilíbrio de elétrons e lacunas, no contorno dos grãos. A característica do elemento A em função da corrente i e da sua variação com o tempo (di/dt) pode ser vista na Figura 3.5. Os valores do elemento A foram determinados a partir de medições, isto é, da análise das formas de onda de corrente e de tensão. Para tanto, os autores variaram os níveis de corrente e os seus tempos de frente. De acordo com Schmidt et al. (1989), para diferentes varistores de ZnO, têm-se pequenas variações nas curvas.

Figura 3.4 – Modelo proposto por Schmidt et al. (1989).



Fonte: Adaptada de Schmidt et al. (1989).

Ainda de acordo com Schmidt et al. (1989), para os outros elementos do circuito mostrado na Figura 3.4 têm-se que: a capacitância C do modelo depende da taxa de crescimento da tensão, do valor máximo da tensão e da temperatura. Ela foi medida como cerca de $0,8 \text{ nF}$ para transitórios muito rápidos e cerca de $1,5 \text{ nF}$ para transitórios mais lentos; a alta resistência ôhmica $R(\theta)$ depende principalmente da temperatura e só é interessante para correntes baixas ($< 1 \text{ A}$), podendo ser negligenciada para altas correntes;

Figura 3.5 – Característica do elemento A em função de i e di/dt .

Fonte: (SCHMIDT et al., 1989).

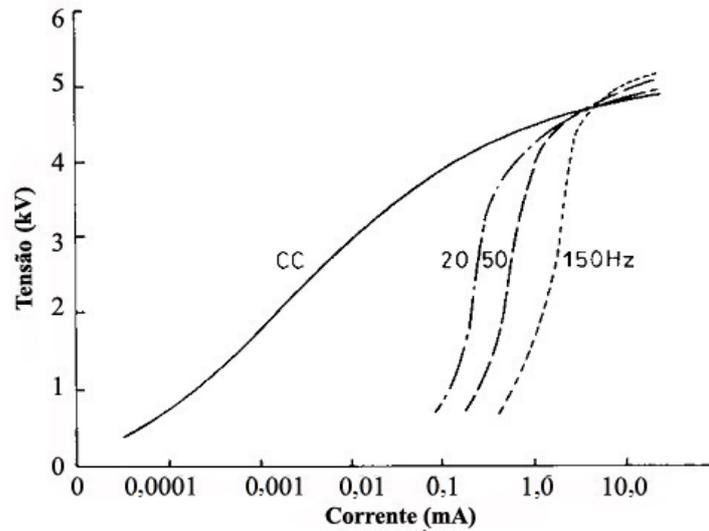
a indutância L representa os campos magnéticos internos e externos e é adotado o valor de $1 \mu\text{H}/\text{m}$. Por outro lado, Bayadi et al. (2003) mostraram que a simulação do circuito equivalente resultou em um excelente ajuste, contudo para a realização da simulação, os autores necessitaram de dados de outros trabalhos, para determinar os parâmetros do modelo.

Haddad et al. (1990) verificaram que, além de o varistor de ZnO apresentar uma curva característica V - I e uma dissipação de potência diferente para diferentes tensões CC e CA, as curvas características se cruzavam em um valor de tensão próximo à tensão nominal do varistor, conforme mostrado na Figura 3.6. Horiuchi et al. (1988) já tinha relatado a diferença na dissipação de potência para diferentes tensões CC e CA.

A partir destas observações, Haddad et al. (1990) propuseram o modelo exposto na Figura 3.7. R_p , R_s e a capacitância C devem ser determinadas levando-se em consideração a tensão (U) e frequência do sinal aplicado (f). Já para a resistência R_{gs} , deve-se levar em consideração apenas a frequência do sinal aplicado. R , por sua vez, depende somente da tensão aplicada. R_g representa a resistência do grão de ZnO, com bastante influência na modelagem do comportamento do varistor, na região de altas correntes. Os vários elementos do modelo têm como objetivo representar os diferentes comportamentos da resistência não linear em função da frequência, conforme mostrado na Figura 3.6.

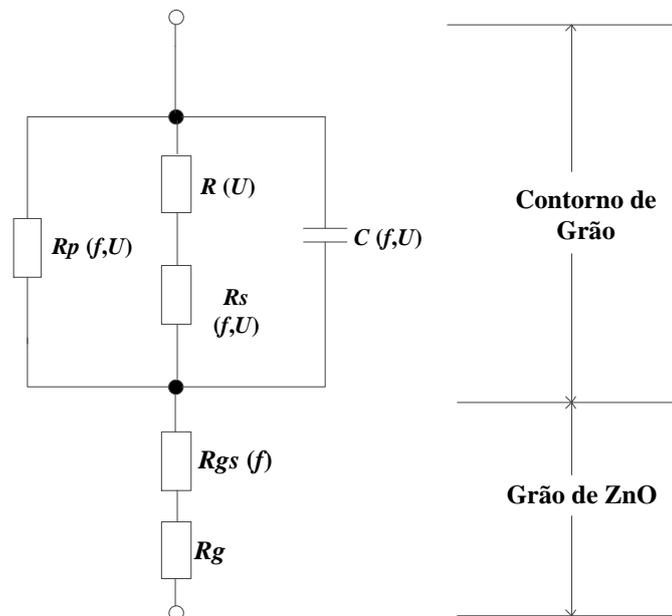
O uso do modelo, apresentado na Figura 3.7, é limitado à primeira região da curva característica $V-I$, devido à ausência de elementos indutivos e a consideração apenas da variação da frequência na região de baixas correntes.

Figura 3.6 – Curvas características do varistor de ZnO para diferentes frequências.



Fonte: Adaptada de Haddad et al. (1990).

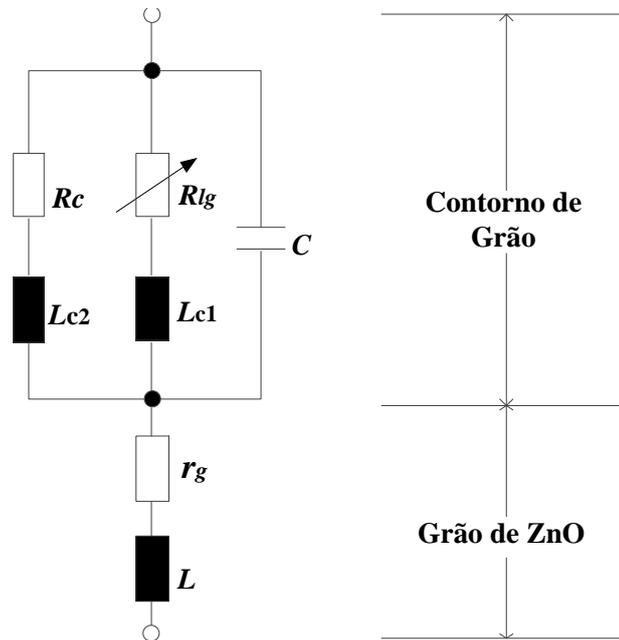
Figura 3.7 – Modelo proposto por Haddad et al. (1990).



Fonte: Adaptada de Haddad et al. (1990).

Haddad e Naylor (1999) observaram que o tempo necessário para atingir o pico da corrente diminui à medida que a amplitude da corrente aumenta. Eles realizaram ensaios experimentais com impulsos de corrente de frente rápida e com tempos de frente entre 1 e 3 μs para extrair esta conclusão. Os autores atribuíram o fenômeno a mudanças no caminho da corrente no interior do varistor e propuseram o circuito equivalente visualizado na Figura 3.8 para representar o efeito dinâmico.

Figura 3.8 – Modelo proposto por Haddad e Naylor (1999).



Fonte: Adaptada de Haddad e Naylor (1999).

O circuito mostrado na Figura 3.8 é composto por duas partes, uma para representar a resistência dos grãos de óxido de zinco, r_g e indutância L , a qual está associada à condução de corrente pelo supressor de surto. A outra parte é composta por três ramos paralelos para representar a fina camada intergranular. O primeiro ramo foi idealizado para representar os impulsos de corrente com elevados valores de amplitude, sendo composto pela resistência de alta não linearidade R_{lg} em série com a indutância L_{c1} . O segundo ramo foi idealizado para representar o atraso no tempo de frente para correntes impulsivas de baixas amplitudes, de acordo com a teoria de múltiplos caminhos da corrente. O efeito do atraso é obtido quando se considera que: a indutância L_{c1} é menor que a indutância

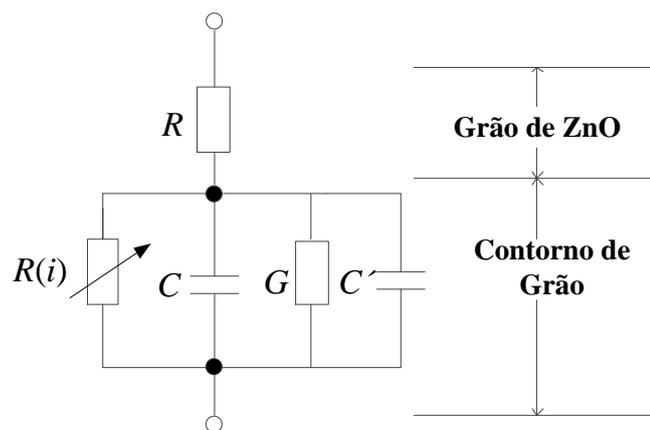
L_{c2} , e a resistência não linear R_{lg} é inferior à resistência linear R_c . O terceiro ramo, da capacitância C , representa o efeito capacitivo entre os terminais do supressor de surto, como também a capacitância existente na camada intergranular.

Apesar do modelo proposto por Haddad e Naylor (1999) ser baseado em medições, o fato da indutância do modelo diminuir com o aumento da amplitude de corrente, contraria o comportamento elétrico esperado, uma vez que o campo magnético é mais intenso para maiores amplitudes de corrente.

Com base na microestrutura do varistor de ZnO e na polarização dos campos elétricos alternados, Xin et al. (2011) propuseram um modelo para altas frequências, mostrado na Figura 3.9. O modelo é composto por resistências lineares e não lineares e capacitâncias lineares. De acordo com os autores, o grão de ZnO pode ser representado por uma resistência fixa R , e o comportamento elétrico nos contornos dos grãos da seguinte forma: a corrente de condução é representada pelo ramo com a resistência não linear $R(i)$; a corrente instantânea associada à polarização por deslocamento é representada pela capacitância C ; e a corrente de relaxamento é representada pela capacitância complexa $G + j\omega C'$.

O uso do modelo, apresentado na Figura 3.9, não considera os elementos indutivos, contudo considera a variação de frequência na região de baixas correntes. Sendo assim, ele tem seu uso limitado à primeira região da curva característica $V-I$.

Figura 3.9 – Modelo proposto por Xin et al. (2011).



Fonte: Adaptada de Xin et al. (2011).

Pelo exposto, pode-se observar que os modelos elétricos baseados na microestrutura do varistor auxiliam no entendimento do comportamento físico do supressor de surto de ZnO. Contudo, em sua grande maioria, não expõem os valores dos parâmetros dos modelos, o que impossibilita sua reprodução. Além disso, os modelos são baseados, na maioria das vezes, somente em medições na região de baixas correntes. Dessa forma, a generalização do comportamento elétrico é comprometida, principalmente devido às diferentes características elétricas do supressor de surto de ZnO em cada uma das três regiões de operação.

3.2 Modelos Empíricos de Supressores de Surto de ZnO

Os modelos empíricos se baseiam em dados experimentais e a curva característica $V-I$ é obtida pela realização de ensaios. Assim, para caracterizar a região de baixas correntes, o varistor de ZnO é normalmente submetido a diferentes níveis de tensão na frequência industrial, registrando-se os valores de tensão e corrente. Para caracterizar a região altamente não linear, são aplicados ao varistor impulsos de corrente de manobra com diferentes valores de amplitudes, geralmente entre 125 A e 2000 A. Já para a região de altas correntes, são geralmente aplicados impulsos de corrente com forma de onda padrão de descarga atmosférica ($8/20 \mu s$) com diferentes valores de amplitudes, geralmente entre 2 kA e 20 kA. Uma vez obtida a curva característica $V-I$, os fabricantes disponibilizam os *datasheets* dos supressores de surto, que contém as características inerentes a cada tipo de supressor de surto.

Dentre os modelos de supressores de surto de ZnO, o mais comum e utilizado em estudos sistêmicos é o modelo denominado Convencional, devido principalmente à sua simplicidade e facilidade de aplicação. Este modelo representa a característica $V-I$ do supressor de surto de ZnO apenas por uma resistência não linear nas três regiões de operação. Na Figura 3.10 pode ser visto o circuito elétrico representativo do modelo. A curva característica $V-I$ da resistência não linear é normalmente representada por vários segmentos, no qual cada segmento pode ser aproximado por retas ou pela seguinte equação (Leuven EMTP Center, 1987):

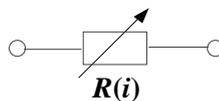
$$i = p \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q, \quad (3.1)$$

em que os parâmetros i e v são a corrente e a tensão no supressor de surto, respectivamente, q é o expoente, p o multiplicador para cada segmento e V_{ref} é uma tensão de referência arbitrária. V_{ref} tem a função de normalizar a equação e prevenir problemas de representação numérica (*overflow*) durante a potenciação. Os parâmetros da equação são obtidos com base nos pontos da curva V - I apresentada no *datasheet* do tipo de supressor de surto escolhido para ser modelado.

O modelo apresenta deficiências, entre elas estão:

- a simplificação do comportamento elétrico do supressor de surto de ZnO utilizando uma única resistência não linear. Isto, faz com que o comportamento capacitivo, predominante na região de baixas correntes, não seja representado no modelo Convencional.
- a não representação do comportamento indutivo do supressor de surto quando submetido a impulsos de corrente de manobra e descargas atmosféricas, caracterizado pelo atraso da corrente em relação à tensão.
- a não representação da característica dinâmica do supressor de surto na região de altas correntes, em que a tensão residual aumenta à medida que o tempo de frente do impulso de corrente diminui (BAYADI et al., 2003; LIRA et al., 2012; BEZERRA et al., 2014). Isto se deve ao fato da curva V - I ser obtida utilizando-se apenas impulsos de corrente com forma de onda 8/20 μ s.

Figura 3.10 – Modelo da resistência não linear (Modelo Convencional).



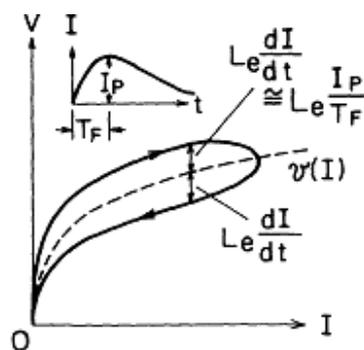
Fonte: Adaptada pelo autor.

Com objetivo de representar as características elétricas do supressor de surto de ZnO na região de altas correntes, Tominaga et al. (1979) propuseram um modelo baseado no efeito dinâmico do supressor de surto. O efeito dinâmico é representado na Figura 3.11.

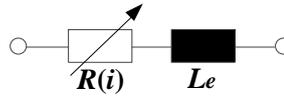
Eles observaram que o efeito de histerese existente entre a tensão e a corrente no supressor de surto de ZnO, na região de altas correntes, é semelhante ao produzido por uma indutância equivalente em série com uma resistência não linear. Na Figura 3.12 é mostrado o modelo elétrico que representa o fenômeno. De acordo com os autores, a indutância Le emula a elevação da tensão com a diminuição do tempo de crista do impulso de corrente (maior di/dt), o que contemplaria o efeito dinâmico do supressor de surto.

Os autores também verificaram que a indutância Le deve ser determinada a partir do conhecimento prévio da forma de onda da corrente, especificamente do tempo de frente e valor de pico. Assim, Le não deve ter valor fixo para todas as condições de operação. Para contemplar essa exigência, Tominaga et al. (1979) propuseram curvas de indutâncias normalizadas, em que é possível determinar o valor da indutância Le conhecendo-se os valores da densidade de corrente e tempo de frente do impulso de corrente, conforme mostrado na Figura 3.13. Observa-se na Figura 3.13 que a indutância Le é maior para impulsos de corrente com tempos de frente mais rápidos, o que proporciona uma tensão residual maior, contemplando o efeito dinâmico do supressor de surto de ZnO. Entretanto, a indutância Le do modelo proposto por Tominaga et al. (1979) decresce com o aumento da amplitude de corrente, o que contraria o comportamento elétrico esperado, uma vez que o campo magnético é mais intenso para maiores amplitudes de corrente.

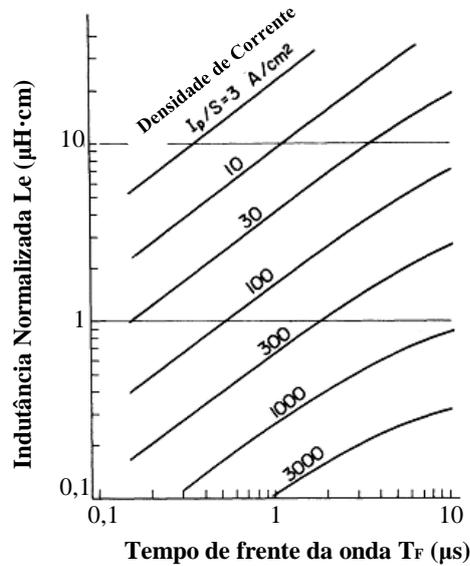
Figura 3.11 – Efeito dinâmico do supressor de surto de ZnO.



Fonte: (TOMINAGA et al., 1979).

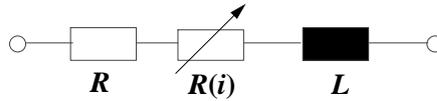
Figura 3.12 – Modelo proposto por Tominaga et al. (1979).

Fonte: Adaptada de Tominaga et al. (1979).

Figura 3.13 – Valor Normalizado da Indutância Le .

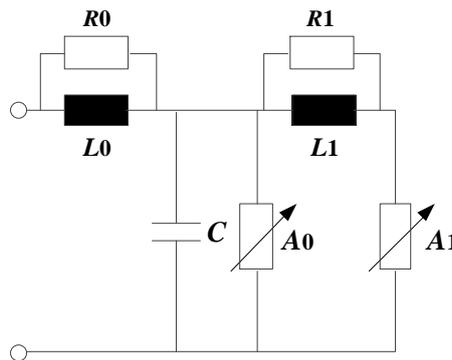
Fonte: Adaptada de Tominaga et al. (1979).

Conhecido como modelo do Cigré, o modelo proposto por Hileman et al. (1990) é uma simplificação do modelo de Schmidt et al. (1989). O modelo é apresentado na Figura 3.14. Observa-se que foram eliminadas do modelo de Schmidt et al. (1989), a resistência $R(\theta)$ dependente da temperatura, a resistência atribuída ao grão de ZnO e a capacitância C . A resistência $R(i)$ é o único elemento não linear do modelo e pode ser determinada utilizando os pontos médios da curva de histerese para o impulso de corrente 8/20 μs – 10 kA. O valor da resistência R pode ser obtido a partir das curvas propostas por Schmidt et al. (1989), ou a partir de equações propostas por Hileman et al. (1990). L é a indutância atribuída ao supressor de surto, adotada como sendo 1 $\mu\text{H}/\text{m}$.

Figura 3.14 – Modelo proposto por Hileman et al. (1990).

Fonte: Adaptada de Hileman et al. (1990).

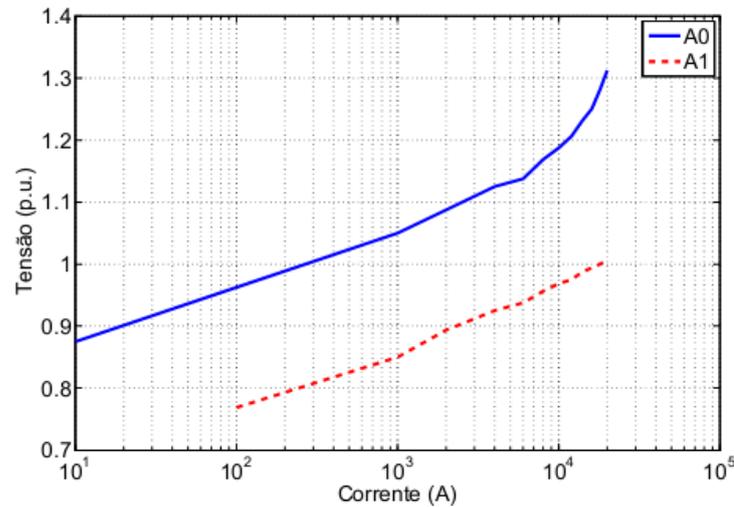
Em 1992, o grupo IEEE W.G.3.4.11 propôs o modelo mostrado na Figura 3.15. Nesse modelo, a característica não linear $V-I$ do supressor de surto é obtida pelas duas resistências não lineares A_0 e A_1 . O filtro $R-L$ entre as duas resistências não lineares é composto pela resistência R_1 e indutância L_1 , sendo responsável por proporcionar o efeito dinâmico existente no supressor de surto de ZnO. Para frentes de onda lentas, o filtro R_1-L_1 apresenta uma impedância muito baixa e as resistências não lineares do modelo estão essencialmente em paralelo. Para frentes de onda rápidas, o filtro R_1-L_1 apresenta uma alta impedância. Como consequência disto, há uma maior condução de corrente elétrica na resistência não linear A_0 que na resistência não linear A_1 . Como A_0 possui uma tensão característica maior que A_1 , conforme mostrado na Figura 3.16, o modelo fornece uma tensão maior para transitórios mais rápidos. De acordo com os autores, essa característica reproduz o efeito dinâmico verificado no supressor de surto de ZnO.

Figura 3.15 – Modelo proposto por IEEE Working Group 3.4.11 (1992).

Fonte: Adaptada de IEEE Working Group 3.4.11 (1992).

A indutância L_0 representa a indutância associada a campos magnéticos nas imediações do supressor de surto. A capacitância C emula o efeito capacitivo do mesmo e

Figura 3.16 – Relação $V-I$ das resistências não lineares do modelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992).



Fonte: Adaptada de IEEE Working Group 3.4.11 (1992).

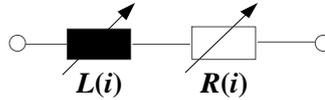
a resistência R_0 é utilizada para evitar oscilação numérica durante a simulação do modelo em programas computacionais. O IEEE Working Group 3.4.11 propôs fórmulas para calcular L_0 , R_0 , C , R_1 e L_1 , a partir das dimensões físicas do supressor de surto.

Uma das limitações do modelo proposto pelo IEEE Working Group 3.4.11 é a determinação dos parâmetros do modelo, pois para diversos elementos é necessário realizar processos iterativos até que um comportamento satisfatório seja obtido. Bayadi et al. (2003) relataram que o modelo apresenta uma queda brusca na cauda da forma de onda da resposta da tensão residual. Esta queda se constitui em outra limitação do modelo, pois a forma de onda da tensão obtida na simulação é bastante discordante da forma de onda obtida experimentalmente, na maioria das vezes.

O modelo mostrado na Figura 3.17 foi proposto por Kim et al. (1996). Este modelo consiste em uma resistência não linear em série com uma indutância não linear, utilizada para produzir o efeito dinâmico do supressor de surto. O modelo foi concebido a partir da característica $V-I$ do impulso de corrente padrão de descargas atmosféricas ($8/20 \mu s$) e da taxa de crescimento da frente de onda da tensão em relação à frente de onda rápida ($1/2 \mu s$). O modelo apresenta algumas dificuldades na obtenção de seus parâmetros, pois, para se determinar a curva da indutância não linear, é necessário construir um laço de histerese a partir da curva característica $V-I$. A obtenção do laço de histerese é de difícil

determinação. Além disso, a aplicação do modelo necessita de uma rotina computacional para calcular a característica não linear da indutância.

Figura 3.17 – Modelo proposto por Kim et al. (1996).

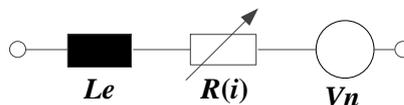


Fonte: Adaptada de Kim et al. (1996).

Hagiwara et al. (1997) propuseram um modelo que contempla o efeito dinâmico utilizando para isso a taxa de energia absorvida pelo supressor de surto. O modelo é apresentado na Figura 3.18. Ele é composto por uma indutância linear em série com uma resistência não linear e uma fonte de tensão. A indutância linear é dimensionada com base na altura do supressor de surto, sendo utilizado o valor de $1 \mu\text{H}/\text{m}$. Este valor também tinha sido adotado em vários trabalhos, tais como: Schmidt et al. (1989), Hileman et al. (1990), IEC 60099-4 (2004) e IEEE C62.11 (2012), e se refere a um supressor de surto externo, isolado a ar atmosférico.

No modelo, a curva característica V - I da resistência não linear é obtida da mesma forma que no modelo de Tominaga et al. (1979), utilizando os pontos médios da curva de histerese dos sinais de tensão e corrente medidos para um impulso de corrente atmosférico padrão ($8/20 \mu\text{s}$). No modelo, a fonte de tensão possui comportamento exponencial, e é dada em função da taxa de energia absorvida pelo supressor de surto.

Figura 3.18 – Modelo proposto por Hagiwara et al. (1997).

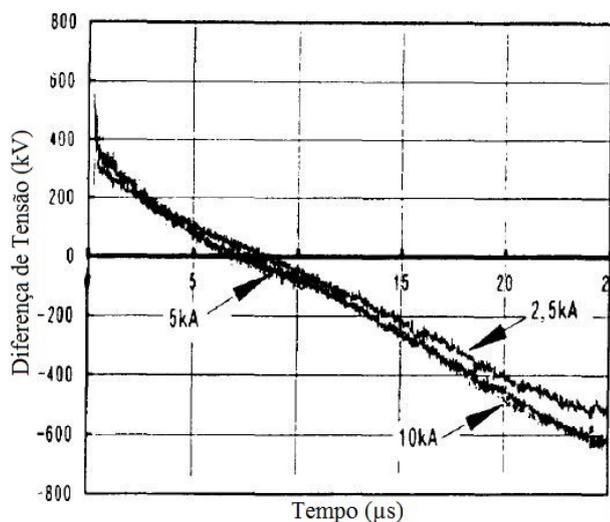


Fonte: Adaptada de Hagiwara et al. (1997).

Com o intuito da comprovação do modelo, Hagiwara et al. (1997) realizaram experimentos e simulações e constataram que: 1) a forma de onda da tensão residual medida para várias amplitudes de impulsos de corrente, com forma de onda $8/20 \mu\text{s}$, apresenta-se

com valores distintos, quanto maior a amplitude da corrente maior será o valor da tensão residual; 2) quando foram aplicados, na simulação, os mesmos impulsos de corrente no modelo da resistência não linear $R(i)$, os autores observaram o mesmo fenômeno. Baseado nesta constatação, os autores realizaram a operação matemática de diferença entre as formas de onda das tensões residuais (medidas e simuladas), e constataram que a diferença de tensão é praticamente a mesma nos vários níveis de amplitude de corrente, ou seja, a diferença de tensão não depende da amplitude de corrente, como pode ser observado na Figura 3.19. A constatação esclarece a incoerência entre o comportamento esperado da indutância (indutâncias maiores para maiores amplitudes de corrente) e a indutância dos modelos propostos por Tominaga et al. (1979) e Haddad e Naylor (1999) que propõem indutâncias menores para maiores amplitudes de corrente.

Figura 3.19 – Característica da diferença de tensão entre a tensão medida e a tensão obtida utilizando o modelo da resistência não linear $R(i)$ para a forma de onda 8/20 μs .

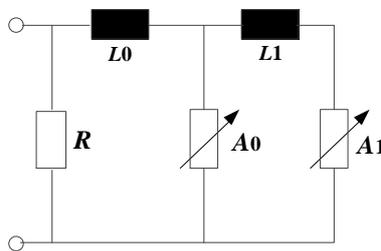


Fonte: Adaptada de Hagiwara et al. (1997).

Apesar das relevantes contribuições do trabalho de Hagiwara et al. (1997) e dos bons resultados apresentados pelo modelo proposto, faz-se necessário conhecer de antemão os sinais do impulso de corrente e a respectiva tensão residual, para que a taxa de absorção de energia possa ser calculada. O modelo também não contempla a capacitância do supressor de surto, importante na região de baixas correntes, o que inviabiliza sua aplicação nessa região.

Um novo modelo foi proposto por Pinceti e Giannettoni (1999). Ele se apresenta como uma simplificação do modelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992). Na Figura 3.20 é possível verificar que as resistências R_1 e R_0 do modelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992) foram substituídas pela resistência R , a qual tem a finalidade de evitar problemas numéricos. Além disso, eles propuseram a eliminação da capacitância C , pois segundo os autores, ela tem pouco efeito sobre o comportamento do modelo na região de altas correntes.

Figura 3.20 – Modelo proposto por Pinceti e Giannettoni (1999).



Fonte: Adaptada de Pinceti e Giannettoni (1999).

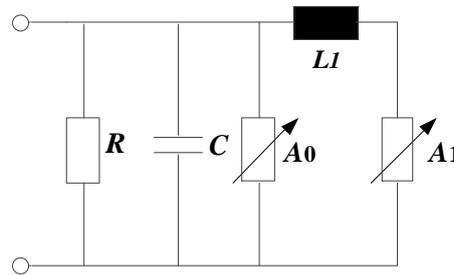
A principal vantagem do modelo proposto é a fácil determinação dos parâmetros e por ser mais simples. Os parâmetros do modelo são determinados apenas pela característica elétrica do supressor de surto e não é necessário o uso de processos iterativos na determinação dos parâmetros. De acordo com os autores, o modelo apresenta erros inferiores a 4,5% para transitórios com tempos de frente entre 1 e 30 μs .

Outros autores também usaram o modelo de Pinceti e Giannettoni (1999) para realizar seus estudos. Bayadi et al. (2003) verificaram uma queda de tensão inesperada na cauda da curva de tensão, cuja forma de onda produzida pelo modelo às vezes é bastante discordante da forma de onda de tensão obtida experimentalmente. Nos estudos de Lira et al. (2007b) foram observadas oscilações numéricas na forma de onda da tensão fornecida pelo modelo de Pinceti e Giannettoni (1999).

Uma outra simplificação do modelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992) foi proposta por Fernandez e Diaz (2001), o qual é mostrado na Figura 3.21. Em comparação com o modelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992), pode-se observar que R_0 , R_1 e L_0 foram descartados, restando apenas a indutância L_1 entre as resistências não lineares A_0 e A_1 . No

modelo, C representa a capacitância terminal-terminal do supressor de surto e a resistência R se destina a evitar oscilações numéricas. A vantagem do modelo é que todos os dados necessários podem ser encontrados no catálogo do fabricante ou, alternativamente, em medições experimentais, além de o mecanismo de ajuste dos parâmetros não exigir cálculos iterativos. Por outro lado, o cálculo dos parâmetros do modelo possui muitas etapas para a determinação de A_0 , A_1 e principalmente L_1 .

Figura 3.21 – Modelo proposto por Fernandez e Diaz (2001).



Fonte: Adaptada de Fernandez e Diaz (2001).

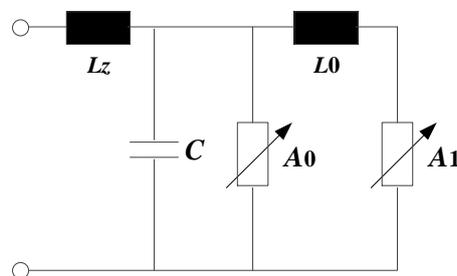
Os autores observaram que para impulsos de correntes com frentes de onda rápida, entre 1 e 8 μs , o modelo obteve um erro máximo de 1,7% no valor de pico da tensão residual. Por outro lado, eles relatam que em algumas simulações o modelo apresentou oscilações na região do pico da forma de onda da tensão residual, ocasionadas por erros numéricos. Contudo, Bayadi et al. (2003) afirmam que uma boa escolha do passo de tempo pode eliminar ou minimizar o problema.

Mardira e Saha (2002) realizaram mais uma simplificação do modelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992), conforme apresentado na Figura 3.22. Apesar da alta similaridade entre os modelos, os métodos utilizados para determinação dos parâmetros são distintos. A indutância L_z é atribuída ao efeito indutivo devido à condução de corrente pelo supressor de surto, e o seu valor é muito baixo, comparado à capacitância do supressor de surto. O valor da indutância L_z adotado pelos autores foi 0,1 μH . A característica V - I das resistências não lineares A_0 e A_1 são calculadas a partir da equação $I = KV^\alpha$, em que I e V são a corrente e a tensão no supressor de surto, respectivamente. Os valores de K e α são obtidos utilizando pontos dos sinais medidos de tensão e corrente para o impulso

8/20 μs - 10 kA. A indutância L_0 é associada à indutância devido a campos magnéticos nas imediações do supressor de surto. Essa indutância é responsável por caracterizar o comportamento do supressor de surto frente a descargas atmosféricas, em que o pico da tensão ocorre antes do pico da corrente. O valor da indutância L_0 é calculado por uma equação empírica deduzida pelos autores, e que utiliza pontos dos sinais medidos de tensão e corrente para o impulso 8/20 μs - 10 kA.

O modelo proposto por Mardira e Saha (2002) foi validado apenas para o impulso de corrente com forma de onda 8/20 μs , portanto, não é possível avaliar o efeito dinâmico do modelo. Além disso, apenas o valor de pico da tensão residual foi avaliado, deixando de se avaliar, por exemplo, a absorção de energia do supressor de surto. Apesar disso, bons resultados foram obtidos para o valor de pico da tensão residual quando comparado com dados do fabricante do supressor de surto e de medição. Os erros com relação aos dados do fabricante para as amplitudes de corrente de 1, 5, 10 e 20 kA foram inferiores a 3%, e este valor é equivalente aos erros dos dados de medição.

Figura 3.22 – Modelo proposto por Mardira e Saha (2002).



Fonte: Adaptada de Mardira e Saha (2002).

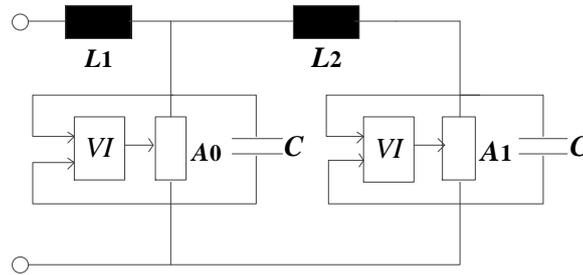
A partir do modelo de Pinceti e Giannettoni (1999), Magro et al. (2004) propuseram um novo método para determinação dos parâmetros do modelo mostrado na Figura 3.20. De acordo com os autores, o modelo de Pinceti e Giannettoni (1999) apresenta baixa exatidão para diversos supressores de surto de média tensão. Além disso, a determinação dos parâmetros desse modelo necessita de dados que não são comumente disponibilizados nos *datasheets* dos fabricantes, como por exemplo, a tensão residual para o impulso de corrente de frente rápida (em torno de 1 μs). A fim de contornar esta restrição, Magro et

al. (2004) propuseram um método em que os parâmetros L_0 e L_1 do modelo de Pinceti e Giannettoni (1999) não dependem da tensão residual para o impulso de corrente de frente rápida.

Os autores aplicaram ao modelo duas diferentes formas de onda de impulso de corrente: o impulso de corrente padrão de descarga atmosférica ($8/20 \mu s$) e o impulso de corrente com frente de onda rápida ($1/5 \mu s$), ambos com amplitude de 10 kA. Os valores de pico da tensão residual fornecidos nos catálogos de duzentos supressores de surto, de seis diferentes tipos, com valores de MCOV (Máxima Tensão de Operação Contínua) entre 3 e 360 kV, foram comparados com os resultados de simulação do modelo. A incerteza média obtida foi de 3%. Entretanto, a validação do modelo apenas para duas formas de onda de impulso de corrente e um valor de amplitude, compromete a avaliação da capacidade do modelo em representar o efeito dinâmico verificado no supressor de surto de ZnO.

Zitnik et al. (2005) propuseram o modelo visualizado na Figura 3.23. Os autores o desenvolveram a partir do modelo proposto por IEEE Working Group 3.4.11 (1992). A_0 e A_1 representam resistências não lineares, cuja curva característica $V-I$ é obtida aplicando um fator de escala à curva característica $V-I$ dos elementos A_0 e A_1 , presentes no modelo proposto pelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992). Os blocos VI , mostrados na Figura 3.23, representam o fator de escala. Os parâmetros L_1 e L_2 são obtidos a partir dos valores de indutância e tensão de operação do supressor de surto, que de acordo com os autores são encontrados no *datasheet* do fabricante. O valor da capacitância C também é fornecido no *datasheet* do fabricante do supressor de surto, de acordo com os autores. Como restrições a aplicação do modelo, têm-se que: a maioria dos fabricantes não fornece a indutância e capacitância do supressor de surto, e isso dificulta a aplicação do modelo; e o modelo proposto por Zitnik et al. (2005) foi validado apenas para o impulso de corrente com forma de onda $8/20 \mu s$, portanto, não é possível avaliar o efeito dinâmico do modelo.

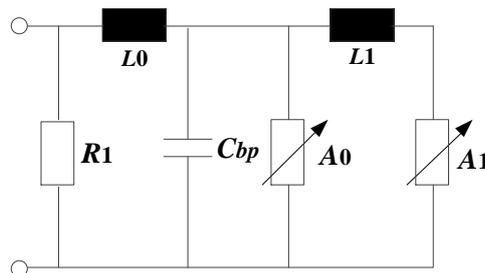
Em uma nova abordagem, Silveira (2009) propõe um modelo matemático baseado na função de Langevin modificada para representar o supressor de surto de ZnO na região de baixas correntes. O modelo possui três parâmetros a serem determinados. Os parâmetros do modelo devem ser ajustados utilizando uma rotina computacional. Os resultados do modelo estão em concordância com a curva $V-I_r$ obtida em laboratório, em que V é a

Figura 3.23 – Modelo proposto por Zitnik et al. (2005).

Fonte: Adaptada de Zitnik et al. (2005).

tensão aplicada e I_r é a componente resistiva da corrente de fuga. Uma deficiência do modelo é que ele não representa a componente capacitiva da corrente de fuga, predominante na região de baixas correntes.

Valsalal et al. (2011) realizaram estudos com impulsos de corrente com frentes de onda muito rápidas (5 a 100 ns), e constataram que nessas condições o pico da corrente ocorre antes do pico da tensão, apresentando um comportamento capacitivo. Os autores atribuíram esse fenômeno à capacitância do supressor de surto. O modelo proposto é visualizado na Figura 3.24. Ele é formado pela adição de um capacitor no modelo proposto por Pinetti e Giannettoni (1999). A metodologia empregada na determinação dos parâmetros do modelo foi a proposta por Magro et al. (2004).

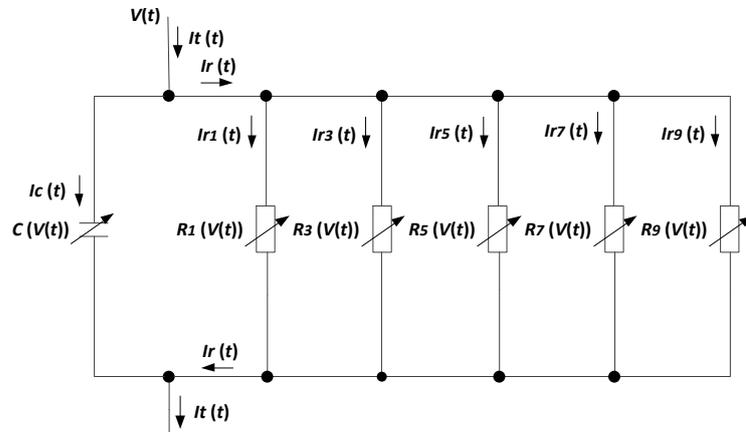
Figura 3.24 – Modelo proposto por Valsalal et al. (2011).

Fonte: Adaptada de Valsalal et al. (2011).

Brito (2013) propõe um modelo capaz de representar o supressor de surto de ZnO na região de baixas correntes. O modelo é baseado em resultados experimentais. Ele é composto por uma capacitância não linear em paralelo com resistências não lineares,

conforme observado na Figura 3.25.

Figura 3.25 – Modelo proposto por Brito (2013).



Fonte: (BRITO, 2013).

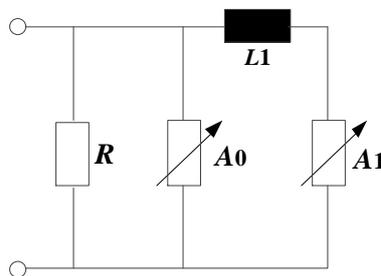
O modelo é representado por várias resistências não lineares em paralelo por questões didáticas, para ilustrar que a componente resistiva depende das componentes harmônicas da tensão. Contudo, o modelo pode ser entendido apenas como uma capacitância não linear em paralelo com uma resistência não linear. Para determinar as curvas dos elementos não lineares do modelo é necessário medir e registrar as formas de onda da tensão e corrente no supressor de surto para vários pontos de operação na região de baixas correntes. Em seguida, é necessário decompor a corrente em suas componentes resistiva e capacitiva. Para isso, é aplicado o método da estimação da capacitância, também proposto pelo autor (BRITO et al., 2013). Os resultados fornecidos pelo modelo apresentaram elevada correlação com os dados de medição. Entretanto, para determinar os parâmetros do modelo faz-se necessário realizar ensaios elétricos. Além disso, o modelo representa apenas a região de baixas correntes.

Vilar (2013) propôs utilizar técnicas de identificação de sistemas, baseado em uma estrutura NARX (*Nonlinear Autoregressive with Exogenous Variable*) polinomial para representar o supressor de surto na região de altas correntes, bem como modelar o efeito dinâmico presente nessa região. Os parâmetros do modelo são ajustados utilizando como dados de entrada impulsos de corrente medidos em laboratório, com formas de onda padronizadas, $8/20 \mu\text{s}$ e $4/10 \mu\text{s}$, e amplitudes de 2, 4, 8 e 10 kA. Outras formas de onda

e amplitudes foram utilizadas para validar o modelo. Os resultados foram comparados com os resultados de alguns modelos propostos na literatura. O modelo proposto por Vilar (2013) apresentou bons resultados para os casos avaliados, indicando a viabilidade da representação matemática. Contudo, faz-se necessário avaliar o modelo em outras situações, como nas regiões de baixas correntes e alta não linearidade.

Unahalekhaka (2014) propôs um modelo de supressor de surto a partir do modelo de Pinceti e Giannettoni (1999). O modelo proposto é mostrado na Figura 3.26. No modelo, em relação ao proposto por Pinceti e Giannettoni (1999), a indutância L_0 é retirada, e o cálculo para determinar a indutância L_1 é modificado. O autor utilizou dados de seis supressores de surto de três fabricantes diferentes. Para cada fabricante, foram utilizados dois supressores de surto com tensão nominal de 18 e 21 kV. Para fins de comparação, o autor utilizou os modelos propostos por IEEE Working Group 3.4.11 (1992) e Pinceti e Giannettoni (1999). O valor de pico das tensões residuais obtidas utilizando os três modelos foram comparados com o valor de pico da tensão residual fornecida pelos fabricantes, para impulsos de corrente com tempo de frente $0,5 \mu\text{s}$ e amplitude 10 kA, e $8/20 \mu\text{s}$ - 3, 5, 10 e 20 kA. O modelo proposto por Unahalekhaka (2014) obteve resultados semelhantes aos outros dois modelos. Dessa forma, a simplificação do modelo proposto por Pinceti e Giannettoni (1999), retirando apenas a indutância L_0 , não refletiu em benefícios significativos.

Figura 3.26 – Modelo proposto por Unahalekhaka (2014).

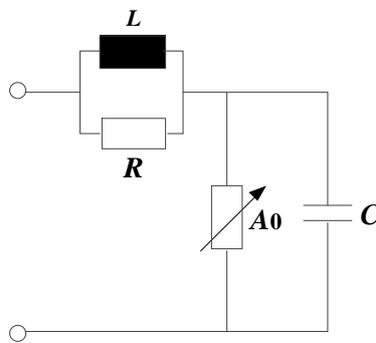


Fonte: Adaptada de Unahalekhaka (2014).

Triruttanapiruk e Yurthagowith (2014) propuseram um modelo simplificado de supressor de surto obtido a partir de ensaios experimentais. O modelo é visualizado na

Figura 3.27. Para evitar possíveis oscilações numéricas é utilizada uma resistência R em paralelo com a indutância L . O valor da resistência R é 10Ω . De acordo com os autores, a capacitância C pode ser obtida por medição, e para o varistor avaliado foi utilizado o valor de 220 pF . A curva característica $V-I$ da resistência não linear A_0 e a indutância L foram obtidas como proposto por Tominaga et al. (1979), ou seja, a curva $V-I$ da resistência não linear A_0 é obtida utilizando pontos médios da curva de histerese medida para o impulso de corrente $8/20 \mu\text{s}$, e o valor da indutância L é calculado a partir da diferença de tensão entre a curva $V-I$ e o valor de pico da tensão.

Figura 3.27 – Modelo proposto por Triruttanapiruk e Yurthagowith (2014).



Fonte: Adaptada de Triruttanapiruk e Yurthagowith (2014).

Diferente dos outros modelos propostos, o circuito do gerador de impulso de corrente foi incluído no algoritmo para estimação dos parâmetros do modelo. Talvez, o objetivo dos autores em considerar o circuito do gerador de impulso de corrente era representar, o mais fiel possível, o sinal registrado no osciloscópio.

Triruttanapiruk e Yurthagowith (2014) compararam a tensão residual medida para um impulso de corrente com forma de onda $8/20 \mu\text{s}$ e amplitudes de 2,5; 5 e 10 kA com as obtidas pelo modelo proposto e os modelos IEEE Working Group 3.4.11 (1992), Pinceti e Giannettoni (1999) e Fernandez e Diaz (2001). Os resultados indicaram elevada correlação entre a tensão residual medida e fornecida pelo modelo proposto. Apesar dos excelentes resultados, a única forma de onda avaliada foi $8/20 \mu\text{s}$, portanto, não é possível avaliar o efeito dinâmico do modelo.

Pelo exposto, os modelos elétricos baseados em características elétricas (macroscópicas) do supressor de surto, dados de medição ou dimensões físicas, possuem bons resultados quando utilizado os mesmos sinais empregados na determinação dos parâmetros do modelo. Entretanto, para sinais com diferentes formas de onda, ou operando em outras regiões, perdem consideravelmente a exatidão. Isso porque os modelos desenvolvidos na literatura têm seus parâmetros ajustados para uma forma de onda específica, geralmente em amplitudes definidas, e na sua grande maioria, só representam uma das três regiões de operação. Os modelos que visam representar o efeito dinâmico do supressor de surto, caracterizado pelo aumento da tensão com a diminuição do tempo de frente do impulso de corrente, abrangem uma estreita faixa de atuação do supressor de surto na região de altas correntes, e necessitam de ajustes nos parâmetros do modelo para contemplar esse efeito.

Desde 1992, com o surgimento do modelo proposto pelo grupo IEEE W.G.3.4.11 pouco tem sido feito na busca de modelos mais precisos. A maioria dos modelos desenvolvidos desde então, são simplificações do modelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992). Apesar de ser colocado como modelo de referência em alguns trabalhos, ele apresenta várias limitações, tais como: representa apenas a região de altas correntes; apresenta dificuldades na determinação dos parâmetros; necessita de utilização de rotinas computacionais; pode apresentar forma de onda da tensão residual discordante da forma de onda da tensão obtida experimentalmente.

Como forma de destacar as publicações referentes a modelos de supressores de surto de ZnO e a inserção desta pesquisa no estado da arte, apresenta-se na Tabela 3.1 uma sinopse da revisão bibliográfica desenvolvida até este ponto.

Observa-se na Tabela 3.1 que a maioria dos modelos propostos na literatura representa apenas a terceira região de operação do supressor de surto de ZnO. Nota-se também que a maioria dos modelos que buscou representar a primeira ou segunda região de operação não teve os seus resultados validados.

Já o modelo elétrico proposto, além de representar as três regiões de operação, contempla o efeito dinâmico, e foi validado a partir da comparação de seus resultados com aqueles obtidos em ensaios elétricos realizados em laboratório, nas três regiões de operação.

Tabela 3.1 – Comparativo das contribuições de modelos de supressores de surto de ZnO propostos por diversos autores.

Referência	Regiões de operação			Efeito dinâmico	Validação
	I	II	III		
(HARNDEN et al., 1972)	✓	✓	✓		
(LEVINSON; PHILIPP, 1975)	✓	✓			
(LEVINSON; PHILIPP, 1976)	✓	✓	✓		
(TOMINAGA et al., 1979)		✓	✓	✓	✓
(Leuven EMTP Center, 1987)		✓			✓
(SCHMIDT et al., 1989)			✓	✓	✓
(HADDAD et al., 1990)	✓				
(HILEMAN et al., 1990)			✓	✓	
(IEEE Working Group 3.4.11, 1992)		✓	✓	✓	✓
(KIM et al., 1996)			✓	✓	✓
(HAGIWARA et al., 1997)		✓	✓		✓
(HADDAD; NAYLOR, 1999)			✓	✓	
(PINCETI; GIANNETTONI, 1999)			✓	✓	✓
(FERNANDEZ; DIAZ, 2001)			✓	✓	✓
(MARDIRA; SAHA, 2002)			✓	✓	✓
(ZITNIK et al., 2005)			✓	✓	✓
(SILVEIRA, 2009)	✓				✓
(XIN et al., 2011)	✓				
(BRITO, 2013)	✓				✓
(VILAR, 2013)			✓	✓	✓
(UNAHALEKHAKA, 2014)			✓	✓	✓
TRIRUTTANAPIRUK; YURTHAGOWIT, (2014)			✓		✓
Esta Tese	✓	✓	✓	✓	✓

✓ Região abordada pelo modelo IEEE, mas os parâmetros do modelo necessitam de ajustes de difícil aplicação.

Fonte: Produzida pelo autor.

Na próxima seção serão abordados os cuidados necessários à medição da tensão residual nos terminais dos supressores de surto de ZnO.

3.3 Medição da Tensão Residual

A existência de um acoplamento indutivo entre o instrumento de aquisição do sinal de tensão e o supressor de surto é relatado em vários trabalhos (DANG et al., 1986; SCHMIDT et al., 1989; HADDAD et al., 1995; ABDUL MALEK, Z. B., 2003; METWALLY, 2010; METWALLY, 2011). Este fenômeno é evidenciado na medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO quando submetidos a impulsos de corrente muito rápidos (com tempo de frente de $1 \mu\text{s}$ ou inferior). O acoplamento indutivo induz uma tensão nos instrumentos de medição que não é atribuída ao comportamento elétrico do supressor de surto.

De acordo com Dang et al. (1986), os principais erros de medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO são:

- diferença de potenciais de “terra” devido ao elevado valor de amplitude do impulso de corrente;
- adição de tensões devido ao eletrodo de gatilho, utilizado para iniciar o impulso de corrente;
- presença de *overshoots* na tensão devido à resposta do divisor de tensão;
- tensões adicionadas à verdadeira tensão V_a obtida pela condução de corrente, devido aos efeitos indutivo L_m e resistivo R_m associado ao *loop* de medição ABDE, visualizado na Figura 3.28, e expresso matematicamente pela Equação 3.2.

$$V = V_a + R_m \times i + L_m \frac{di}{dt}, \quad (3.2)$$

em que:

V = tensão medida;

V_a = verdadeira tensão no supressor de surto;

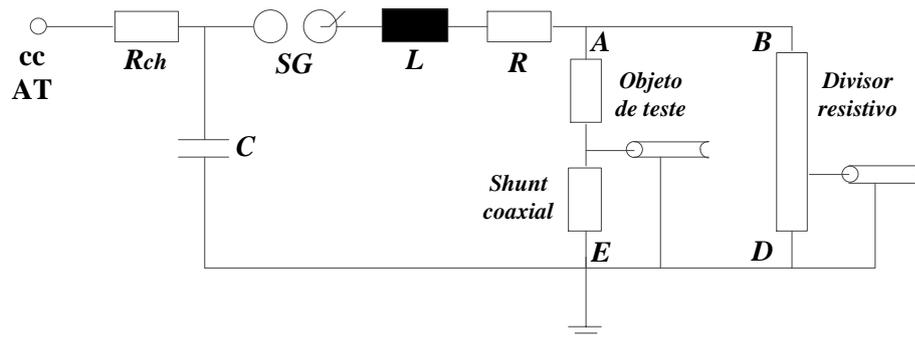
i = corrente conduzida pelo supressor de surto;

R_m = resistência do *shunt* e das conexões do supressor de surto no ramo AE;

L_m = Indutância própria e mútua associada ao fluxo magnético no *loop* ABDE devido à corrente conduzida pelo supressor de surto e no outro *loop* do circuito, ACE.

O circuito do gerador de impulso de corrente mostrado na Figura 3.28 é composto por: um resistor R_{ch} , utilizado para limitar a corrente de carregamento do capacitor C ; um *SparkGap*, centelhador, utilizado para iniciar a descarga do capacitor; um indutor L em série com um resistor R ; o objeto de teste, no caso em análise, o supressor de surto de ZnO; um resistor (*Shunt coaxial*) com baixo valor de resistência, na ordem de miliohms, utilizado para medir a corrente de forma indireta, medindo-se a tensão em seus terminais com auxílio de um osciloscópio digital; e um divisor resistivo, utilizado para medir a tensão nos terminais do objeto de teste. Os valores de amplitude e forma de onda do impulso de corrente dependem da tensão de carregamento do capacitor C e dos valores de R , L e C .

Figura 3.28 – Circuito elétrico do gerador de impulso de corrente incluindo o sistema de medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO.



Fonte: Adaptada de Dang et al. (1986).

Schmidt et al. (1989) relataram que o arranjo de medição influencia significativamente o valor de pico da tensão residual medida. De acordo com os autores, isso ocorre devido ao acoplamento magnético relacionado à corrente (di/dt) e ao *loop* de medição da tensão. Para comprovar esse comportamento, os autores aplicaram em um varistor de ZnO uma onda quadrada com amplitude de aproximadamente 5,4 kA e mediram a tensão residual de duas diferentes formas, utilizando o arranjo convencional (divisor de tensão paralelo ao objeto de teste) e um arranjo coaxial, em que se faz necessário realizar um furo no varistor. No segundo caso, o cabo que interliga o divisor de tensão atravessa o varistor de ZnO, e o divisor de tensão é colocado a jusante e em série com o varistor. Ao final dos

testes, os autores verificaram que com o arranjo convencional o *overshoot* na tensão foi de 85%, já com o arranjo coaxial de apenas 20%.

Ainda com objetivo de confirmar a influência do acoplamento indutivo, Schmidt et al. (1989) aplicaram em um bloco de alumínio (teoricamente um curto-circuito) com as mesmas dimensões do varistor, um impulso de corrente semelhante ao aplicado no varistor. Nos experimentos foram medidos um pico de tensão de aproximadamente 10 kV com o arranjo convencional, e aproximadamente 30 V com o arranjo coaxial, o que confirma a existência do acoplamento indutivo. Ainda de acordo com os autores, o *overshoot* na tensão residual medida, relacionado ao efeito dinâmico da camada intergranular do material ZnO é negligenciável comparado ao *overshoot* da tensão devido ao acoplamento indutivo. Os autores ressaltam a importância de considerar as indutâncias dos cabos de conexão com o supressor de surto.

Haddad et al. (1995) utilizaram um módulo de teste *D-dot probe* para medir a tensão residual e impulsos de corrente de frentes rápidas. De acordo com os autores, o módulo de teste tem o efeito do acoplamento indutivo minimizado. Os resultados das medições da tensão residual com o módulo de teste foram comparados com os resultados das medições utilizando um divisor de tensão misto (resistivo e capacitivo) comercial. Utilizando o módulo de teste não foi observado *overshoot* na tensão.

Drilling et al. (1998) propuseram um arranjo com dois divisores de tensão (medição diferencial). O arranjo foi utilizado para compensar o acoplamento indutivo existente na medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO. Para realizar a medição diferencial foi projetado um circuito eletrônico. Os autores realizaram ensaios com impulsos de corrente com forma de onda $8/20 \mu s$ em um supressor de surto de baixa tensão, e mesmo assim obtiveram diferenças significativas na tensão residual com e sem compensação. Para o impulso $8/20 \mu s - 18,8 \text{ kA}$ sem compensação, o valor de pico da tensão residual foi de 1,425 kV, já no caso com compensação, para mesma forma de onda e amplitude, foi de 1,118 kV, um erro de aproximadamente 27%. Dessa forma, foi verificado que o acoplamento indutivo na medição é significativo, mesmo para frentes de onda não tão rápidas.

A norma IEC 60099-4 (2014) recomenda a compensação na medição da tensão residual, se necessário. A compensação é realizada durante os ensaios. Um bloco metálico com as mesmas dimensões do varistor é utilizado e deve-se medir a tensão residual sobre o bloco, quando aplicado o mesmo impulso de corrente (semelhante em amplitude e forma de onda). Para garantir as mesmas características do impulso de corrente, é sugerido colocar o bloco metálico em série com o varistor. Após a aplicação do impulso de corrente e medição da tensão no bloco metálico, inverte-se a posição do bloco metálico e varistor e mede-se a tensão residual no varistor. A tensão compensada será a tensão medida no varistor menos a tensão medida no bloco metálico.

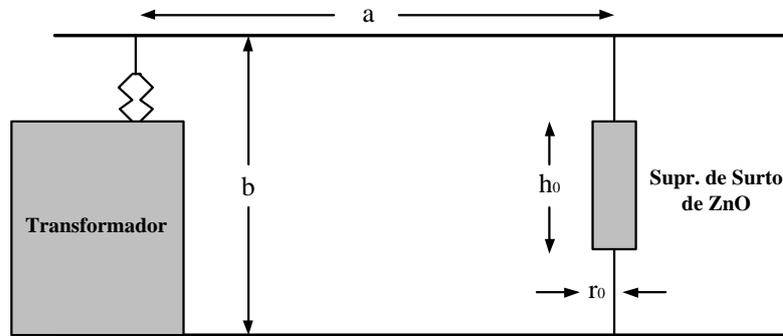
A necessidade da compensação é avaliada comparando-se os valores da tensão residual no bloco metálico e no varistor, quando aplicado um impulso de corrente de frente rápida, $1 \mu\text{s} \pm 10\%$. Se a tensão no bloco for menor que 2% da tensão no varistor não é necessária a compensação. Se a tensão no bloco for maior que 2% e menor que 20% a compensação é necessária. Se a tensão no bloco for maior que 20% é sugerido verificar o circuito gerador e o arranjo de medição.

Metwally (2010, 2011) realizou uma série de ensaios com o módulo de teste *D-dot probe*, similar ao desenvolvido por Haddad et al. (1995). O autor comparou os resultados de medição utilizando o *D-dot probe* com os convencionais divisores de tensão: resistivo, capacitivo com amortecimento e misto (resistivo e capacitivo). Os resultados obtidos com o módulo de teste *D-dot probe* apresentaram valores máximos da forma de onda da tensão residual próximos aos valores máximos da corrente, caracterizando um menor efeito indutivo. Devido a isso, o autor defende a hipótese de que os modelos propostos na literatura para representar o comportamento elétrico do supressor de surto na região de altas correntes, são baseados em medições erradas.

Babae et al. (2011) ressaltaram a importância de considerar o acoplamento indutivo entre o equipamento a ser protegido e o supressor de surto. Com objetivo de dimensionar o *loop* indutivo, os autores propuseram a utilização da Equação 3.3, cujos parâmetros estão colocados na Figura 3.29. O parâmetro h_0 corresponde à altura do supressor de surto, e r_0 ao raio do cabo de ligação do supressor de surto à terra.

$$L = 10^{-7} \left[2b \ln \left(\frac{a}{r_0} \right) + h_0 \right] \quad (\text{H}). \quad (3.3)$$

Figura 3.29 – *Loop* indutivo entre supressor de surto e equipamento a ser protegido.



Fonte: Adaptada de Babae et al. (2011).

A norma IEEE C62.11 (2012) também recomenda a compensação utilizando um bloco metálico não ferroso, da mesma forma que a norma IEC 60099-4 (2014). Entretanto, a norma IEEE C62.11 (2012) não impõe limites para compensação.

A interferência do acoplamento indutivo presente na medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO não é algo consolidado no meio acadêmico. A maior parte dos modelos de supressor de surto, inclusive o modelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992), tiveram os parâmetros de seus modelos ajustados com base em resultados de medições da tensão residual, antes da norma IEC 60099-4 (2004), e por isso, possivelmente, não foi compensada. Não só os modelos, mas os dados dos fabricantes, como valor de pico da tensão residual, obtidos de catálogos anteriores a 2004, possivelmente obtiveram seus resultados baseados na medição de tensões residuais sem compensação.

Outra verificação é que as normas técnicas consideram como passíveis de compensação apenas os impulsos de corrente de frente rápida, em torno de $1 \mu\text{s}$. No entanto, de acordo com resultados de Drilling et al. (1998), foram observados erros na medição da tensão residual de aproximadamente 27%, quando comparados os sinais de tensão com e sem compensação, para um impulso de corrente atmosférico ($8/20 \mu\text{s}$).

Pelo exposto, tem-se assim, que na proposição de um novo modelo, baseado em dados de medição, deve-se avaliar melhor o efeito do acoplamento indutivo, e se necessário, compensá-lo, para que o modelo represente apenas o comportamento elétrico do supressor de surto de ZnO.

Capítulo 4

Ensaio, Medições e Análises

Neste capítulo são apresentados os materiais, procedimentos e arranjos experimentais necessários para geração da base de dados, utilizada na construção e validação do Modelo Elétrico Proposto (MEP). Além disso, são apresentados resultados dos ensaios visando avaliar os níveis de tensões induzidas nas proximidades dos supressores de surto quando submetidos a descargas atmosféricas, bem como avaliar a influência do tipo de invólucro do supressor de surto na medição da tensão residual.

Para construção e validação do MEP foram utilizados doze varistores de ZnO de cinco fabricantes diferentes, com diferentes dimensões físicas e características elétricas. Esses varistores foram submetidos a diversos níveis de tensão na região de baixas correntes, e a impulsos de corrente de manobra e atmosféricas, abordando uma ampla faixa de operação do supressor de surto de ZnO.

Para caracterizar a região de baixas correntes, os varistores foram submetidos a níveis crescentes de tensão, desde valores próximos a zero volt até níveis de tensão um pouco depois do “joelho” da curva característica $V-I$ do supressor de surto, atribuída geralmente à sua tensão nominal. Para cada nível de tensão aplicado foram adquiridas e armazenadas as formas de onda da tensão e corrente de fuga medidas nos varistores.

A região altamente não linear foi caracterizada com aplicações de impulsos de corrente de manobra normalizado ($30/60 \mu s$), com amplitudes de 250, 500, 1000 e 2000 A. Os valores utilizados são típicos de amplitudes de corrente nos supressores de surto quando submetidos a sobretensões de manobra. Para cada impulso de corrente, foram adquiridas e armazenadas as formas de onda do impulso de corrente e da respectiva tensão residual.

Já a região de altas correntes, terceira região da curva $V-I$ do supressor de surto de ZnO, foi caracterizada com aplicações de impulsos de corrente atmosféricos ($8/20 \mu s$), alta corrente ($4/10 \mu s$) e com frentes de onda rápida ($3/6 \mu s$ e $1,5/26 \mu s$), e amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA. As amplitudes e as formas de onda escolhidas representam os impulsos de corrente típicos conduzidos pelos supressores de surto quando submetidos a sobretensões atmosféricas. Para cada impulso de corrente, foram adquiridas e armazenadas as formas de onda do impulso de corrente e da respectiva tensão residual. A utilização de diversas formas de onda tem o objetivo de avaliar o efeito dinâmico do supressor de surto, descrito em vários trabalhos, em que a tensão residual aumenta à medida que o tempo de frente do impulso de corrente diminui.

Nos ensaios realizados com objetivo de avaliar os níveis de tensões induzidas nas proximidades dos supressores de surto e a influência do tipo de seu invólucro na medição da tensão residual, foi utilizado como objeto de teste um supressor de surto de ZnO de distribuição com invólucro de material polimérico. O supressor de surto foi submetido a impulsos de corrente atmosférica. No caso da análise do invólucro, também foram realizados ensaios com invólucro de porcelana e sem invólucro.

4.1 Varistores de ZnO Avaliados

Para realização dos ensaios em laboratório foram disponibilizados, pelo Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), doze varistores de ZnO de cinco fabricantes diferentes, sendo duas unidades para cada tipo de varistor, denominados neste trabalho de varistores tipo A, B, C, D, E e F. Os varistores tipo A e F são do mesmo fabricante. Os varistores possuem diferentes dimensões físicas e características elétricas. Na Tabela 4.1 são mostradas as dimensões físicas dos varistores avaliados, medidas com auxílio de um paquímetro.

Os varistores ensaiados são novos e foram doados por fabricantes de supressores de surto há alguns anos atrás. Dos seis tipos de varistores, apenas os do tipo A são conhecidas as características elétricas, tais como: Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV), Tensão Nominal (U_r) e os valores de pico das tensões residuais para os impulsos de

Tabela 4.1 – Características físicas dos varistores de ZnO.

Varistor	Altura (mm)	Diâmetro (mm)
A1	28,4	41,0
A2	28,3	40,9
B1	27,9	41,0
B2	27,8	41,0
C1	30,1	75,7
C2	30,2	76,0
D1	30,0	49,0
D2	30,5	49,2
E1	22,5	48,3
E2	22,5	48,4
F1	31,5	62,5
F2	31,6	62,3

Fonte: Produzida pelo autor.

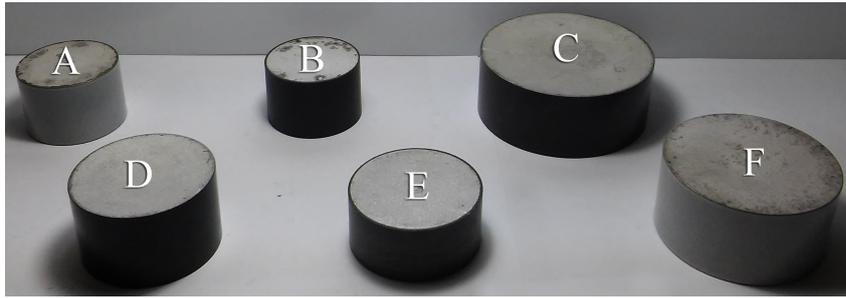
corrente padronizados, exemplos, 30/60 μs (descarga de manobra) e 8/20 μs (descarga atmosférica). Entretanto, isso não é problema porque o MEP será construído e validado com dados de medição. Na Figura 4.1 é visualizada uma fotografia com os seis tipos de varistores diferentes. Na Tabela 4.2 são apresentadas as características elétricas dos varistores tipo A.

Tabela 4.2 – Características elétricas dos varistores A1 e A2.

Características Elétricas	Varistores A1 e A2
Classe de descarga em linha	1
Tensão nominal (U_r)	4 kV_{RMS}
Máxima tensão de operação contínua (MCOV)	3,2 kV_{RMS}
Corrente nominal de descarga	10 kA
Tensão residual para impulso de corrente íngreme	14,63 kV_{PICO}
Tensão residual para corrente de impulso de manobra 500 A	10,67 kV_{PICO}
Tensão residual para impulso atmosférico de 5 kA	12,43 kV_{PICO}
Tensão residual para impulso atmosférico de 10 kA	13,2 kV_{PICO}
Tensão residual para impulso atmosférico de 20 kA	14,9 kV_{PICO}

Fonte: Adaptada do *datasheet* do varistor tipo A.

Figura 4.1 – Fotografia dos tipos de varistores de ZnO ensaiados.



Fonte: Produzida pelo autor.

4.2 Ensaio de Caracterização dos Varistores de ZnO na Região de Baixas Correntes

Para caracterizar o comportamento elétrico dos varistores de ZnO na região de baixas correntes, fez-se necessário submeter os varistores a níveis crescentes de tensão, e para cada diferente nível de tensão, adquirir e armazenar as formas de onda da tensão e corrente de fuga medidas nos varistores.

Os ensaios de caracterização foram realizados utilizando-se como referência o diagrama esquemático do arranjo experimental apresentado na Figura 4.2. O circuito é composto por uma mesa de controle, um transformador elevador de tensão (0 - 100 kV), um resistor de proteção (282 k Ω), um divisor de tensão capacitivo, o objeto de teste (varistor de ZnO) em série com o resistor *shunt* (R_{shunt}) e um osciloscópio digital com memória. Na medição ou aquisição da tensão aplicada ao objeto de teste utilizou-se um divisor de tensão capacitivo. A corrente de fuga total é medida indiretamente, medindo-se a queda de tensão no resistor *shunt*.

A resistência do resistor *shunt* deve ser muito menor que a impedância do objeto de teste, pelo menos cem vezes menor, para que ele não modifique significativamente a corrente de fuga medida. O supressor de surto de ZnO na região de baixas correntes possui valores de impedância na ordem de megaohms, sendo comumente utilizados resistores *shunt* com resistências entre 1 e 10 k Ω . Nos ensaios realizados, foi utilizado o valor de 1 k Ω .

A temperatura ambiente e umidade relativa do ar foram registradas durante as medições, e os valores medidos situaram-se em torno de 28°C com variações de menos de 1°C

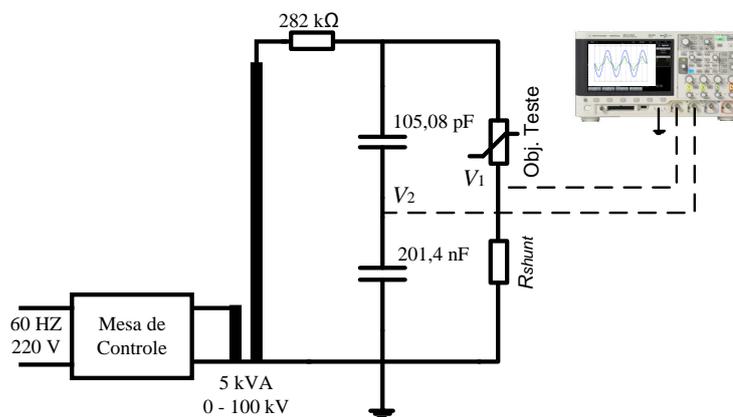
para temperatura, e 48% com variações de menos de 1% para umidade relativa do ar. Embora as características elétricas dos varistores de ZnO operando na região de baixas correntes dependam da temperatura e umidade relativa do ar, admitiu-se que o MEP representa o supressor de surto de ZnO operando em condições ambientes com temperaturas entre 20 e 40°C, e que nessa faixa de operação o comportamento elétrico do varistor de ZnO praticamente não varia. Essa afirmação é razoável, uma vez que se observa em Philipp e Levinson (1977) um pequeno deslocamento da curva $V-I$ na região de baixas correntes quando a temperatura varia de 289°K (25°C) para 342°K (69°C). Portanto, o MEP não representa a dependência do comportamento elétrico do varistor com a temperatura, na região de baixas correntes.

Na Figura 4.3 são observadas as fotografias do kit de alta tensão e mesa de controle utilizados para a realização dos ensaios. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Na Figura 4.4 estão apresentadas as formas de onda da tensão e corrente medidas no varistor A1, operando na região de baixas correntes. Nota-se que a corrente de fuga medida está adiantada da tensão praticamente 90°, o que caracteriza a predominância do comportamento capacitivo do supressor de surto de ZnO nessa região. Comportamentos semelhantes foram observados para os demais varistores.

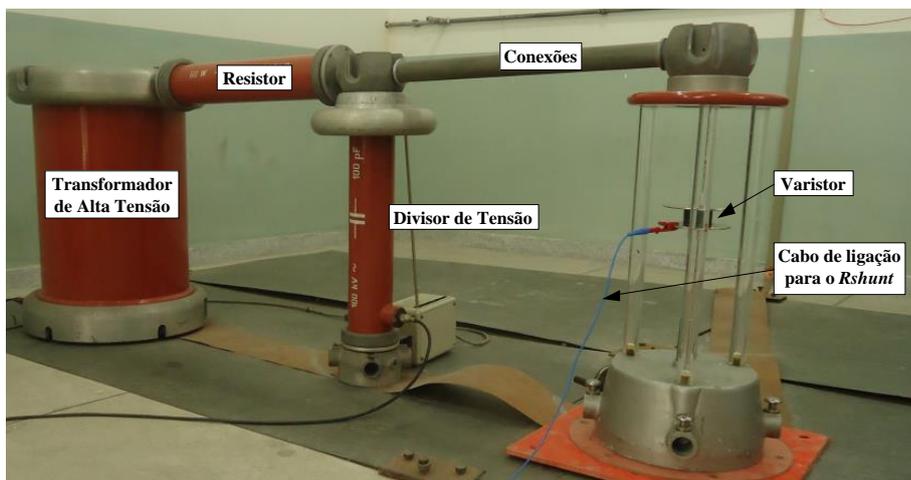
Após as medições e aquisições dos sinais de corrente e tensão, para várias amplitudes de tensão na região de baixas correntes, em cada um dos doze varistores avaliados, foram plotadas as curvas $V-I$ dos varistores para a região de baixas correntes. Para isso, os valores de pico dos sinais de tensão e corrente medidos foram interpolados linearmente, formando a curva característica $V-I$ desejada. Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas características $V-I$ obtidas para os doze varistores utilizados. Nota-se que os varistores de mesmo tipo possuem curvas características semelhantes. As pequenas diferenças devem-se principalmente a pequenas variações de dimensões no processo de fabricação, e a pequenas diferenças na microestrutura do varistor, que ocorrem principalmente no processo de sinterização.

Figura 4.2 – Arranjo experimental utilizado no ensaio de caracterização.

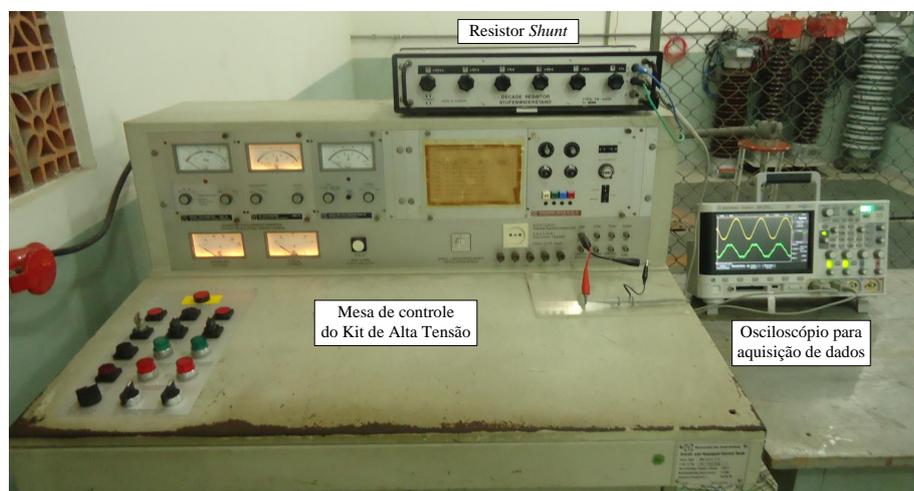


Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.3 – Fotografias: (a) Kit de alta tensão. (b) Mesa de controle e osciloscópio para aquisição de dados.

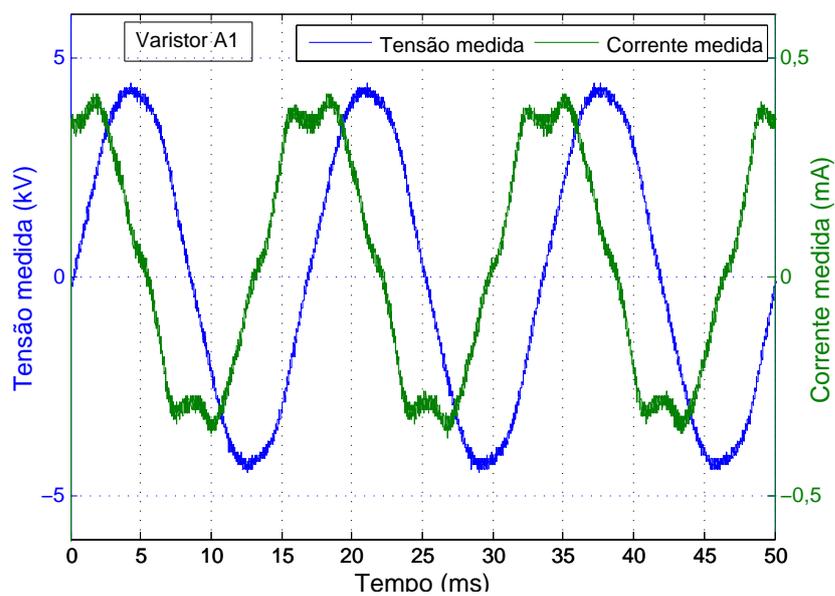


(a)

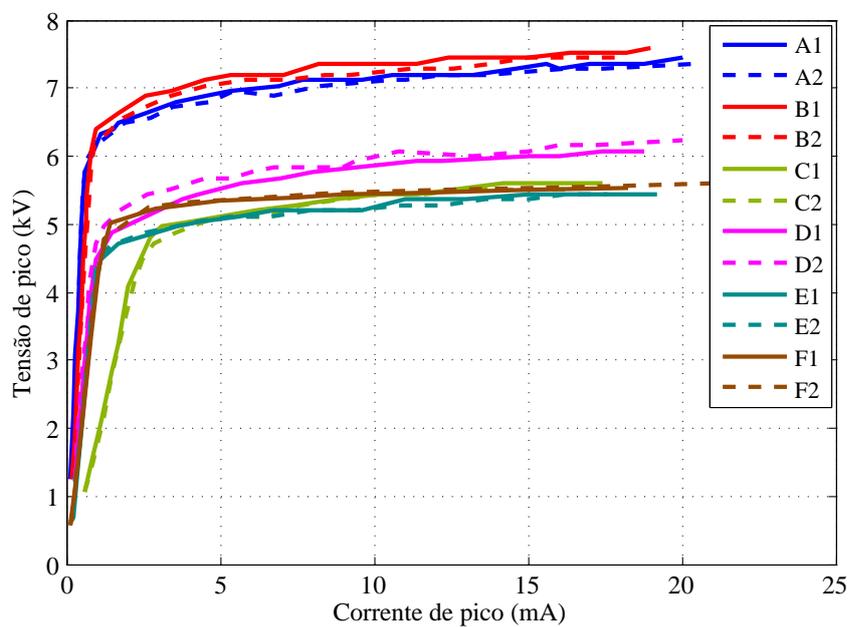


(b)

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.4 – Formas de onda da tensão e corrente medidas na região de baixas correntes.

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.5 – Curvas características $V-I$ na região de baixas correntes.

Fonte: Produzida pelo autor.

4.3 Ensaio de Caracterização dos Varistores de ZnO na Região de Alta Não Linearidade

Para caracterizar o comportamento elétrico dos doze varistores de ZnO na região de alta não linearidade, eles foram submetidos a impulsos de corrente de manobra normatizado, com forma de onda 30/60 μs e amplitudes de 250, 500, 1000 e 2000 A, e as formas de onda do impulso de corrente e tensão residual foram adquiridas e armazenadas.

Nos ensaios foi utilizado o gerador de impulsos de corrente da fabricante Haefely (80 kJ/100 kV), existente no LAT da UFCG, e visualizado na Figura 4.6. O gerador possui 8 estágios, em que cada estágio é formado por um capacitor C de capacitância 2 μF (100 kV) em série com um resistor R . O resistor R é modular, e pode ser utilizado diversos valores de resistência. Os estágios podem ser interligados em paralelo para aumentar a energia liberada no impulso de corrente. Conectado aos estágios estão um indutor L e o objeto de teste.

O objeto de teste (varistor de ZnO) foi posicionado no circuito com o auxílio de um suporte isolante, Figura 4.7(b). Toda operação do gerador de impulso de corrente é realizada através da mesa de controle, Figura 4.7(a). Lira (2008) e Modrusan et al. (1997) explicam o funcionamento do circuito do gerador de impulso de corrente utilizado.

O gerador de impulso de corrente utilizado pode ser representado pelo circuito elétrico mostrado na Figura 4.8. A forma de onda desejada é obtida ajustando-se os valores de R , L e C . Para geração dos impulsos de corrente de manobra com formas de onda 30/60 μs , foi utilizado um arranjo com cinco capacitores com capacitância de 2 μF cada, cinco condutores de alumínio, representados na Figura 4.8 pelos resistores R , com resistências desprezíveis ($\approx 0,0 \Omega$), um indutor com indutância de 61 μH e um resistor *shunt* com resistência de 10,54 m Ω . O sinal de tensão foi medido sob o varistor, utilizando para isso uma ponta de prova de alta tensão. Já o sinal de corrente foi obtido indiretamente, medindo-se a queda de tensão nos terminais do resistor *shunt* (R_{shunt}).

Figura 4.6 – Fotografia do gerador de impulso de corrente do LAT-UFCG. (a) Capacitores, indutores, resistores, centelhador. (b) Transformador elevador de tensão e diodo retificador.



(a)

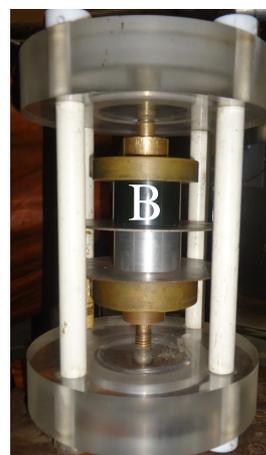
(b)

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.7 – Fotografia do gerador de impulso de corrente do LAT-UFCG e suporte isolante para o varistor. (a) Mesa de controle. (b) Suporte isolante contendo o varistor tipo B sob ensaio.



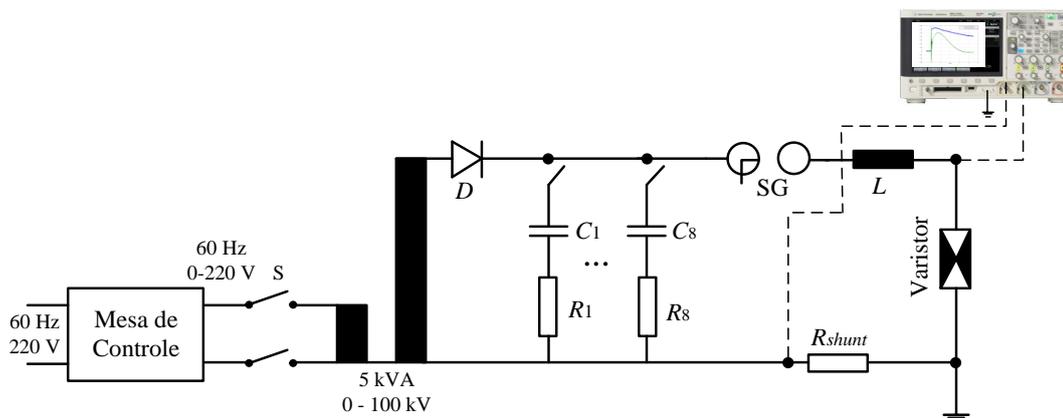
(a)



(b)

Fonte: Produzida pelo autor.

Os valores da tensão de carregamento dos capacitores necessária para proporcionar as amplitudes de corrente desejadas são apresentados na Tabela 4.3. Esses valores foram obtidos em ensaios utilizando varistores sobressalentes, com características idênticas aos varistores avaliados, utilizados exclusivamente para esta finalidade.

Figura 4.8 – Diagrama elétrico do gerador de impulso de corrente utilizado.

Fonte: Produzida pelo autor.

Os doze varistores de ZnO foram submetidos a dois impulsos de corrente de manobra para cada um dos quatro valores de amplitude, totalizando 96 impulsos. As formas de onda dos impulsos de corrente e das tensões residuais foram registradas e armazenadas, para serem utilizadas na construção e validação do MEP.

As formas de onda dos impulsos de corrente e as respectivas formas de onda das tensões residuais medidas no varistor A2 estão mostradas na Figura 4.9. Para os outros varistores de tipos diferentes, as formas de onda das tensões residuais se apresentam com formas de onda semelhantes, porém com diferentes amplitudes. Na Figura 4.9 é possível observar que a tensão residual estabiliza em instantes de tempos diferentes, 80 e 90 μs para amplitudes de corrente de 2 e 1 kA, respectivamente. Para amplitudes de 250 e 500 A não é observado essa tendência dentro do intervalo de tempo de 100 μs . Esse fato deve-se ao amortecimento do impulso de corrente, que é maior para menores valores de tensão de carregamento dos capacitores, e conseqüentemente, menores valores de amplitude de corrente, ou seja, quanto maior for a amplitude de corrente, menor é o tempo necessário para ela atingir valores próximos de zero.

A forma de onda da tensão medida, após a corrente atingir valores próximos de zero ampères, é atribuída à tensão residual presente nos terminais dos capacitores do gerador de impulso de corrente, que se encontra em paralelo com o varistor. Este comportamento da tensão medida não foi considerado nos modelos anteriores, pois não envolve geração de calor nem solicitações elétricas.

Tabela 4.3 – Tensões de carregamento dos capacitores para gerar diversas amplitudes do impulso de corrente 30/60 μ s.

Amplitude de corrente (A)	Tensão de carregamento dos capacitores (kV)					
	A	B	C	D	E	F
Tipos de varistores						
250	9,0	8,5	6,5	7,5	6,5	7,5
500	10,0	9,5	7,5	8,0	7,3	8,0
1000	11,5	11,0	9,0	9,8	8,5	10,0
2000	15,0	14,0	12,0	12,0	12,0	12,5

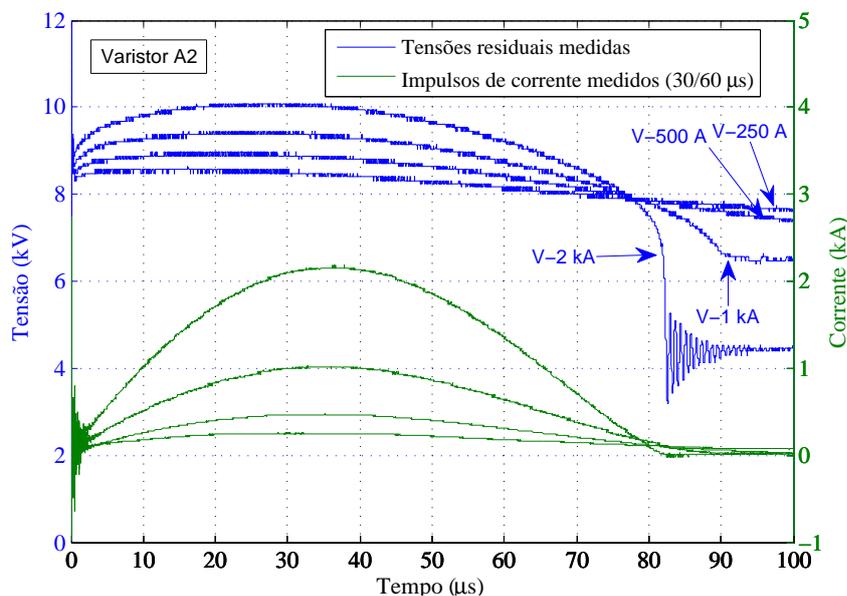
Fonte: Produzida pelo autor.

Embora as normas técnicas IEEE C62.11 (2012) e IEC 60099-4 (2014) e alguns autores (SCHMIDT et al., 1989; HADDAD et al., 1995; ABDUL MALEK, Z. B., 2003) relatem que o acoplamento indutivo, presente na medição da tensão residual, só é significativo para frentes de onda muito rápidas (tempos de frente igual ou inferior a 1 μ s), decidiu-se avaliar a necessidade de compensação para frentes de onda mais lentas, como no caso do impulso de corrente de manobra. Para isso, foi colocado em série com o varistor A2 um bloco de material condutor (alumínio) com as mesmas dimensões físicas do varistor, e mediu-se a tensão residual no varistor A2 e no bloco de alumínio, quando ambos conduziam impulsos de corrente semelhantes em forma e amplitude, conforme recomenda as normas IEEE C62.11 (2012) e IEC 60099-4 (2014).

Analisando os critérios da norma IEC 60099-4 (2014), verificou-se a necessidade da compensação, pois o valor de pico da tensão residual medida no bloco de alumínio foi de 4,5% do valor de pico da tensão residual medida no varistor A2. De acordo com a norma IEC 60099-4 (2014), a compensação é necessária se a tensão residual no bloco for superior a 2% e inferior a 20%. Caso tivesse sido maior que 20%, o arranjo de medição deveria ser analisado. Como descrito no Capítulo 3, a tensão residual compensada será a tensão medida no varistor menos a tensão medida no bloco metálico.

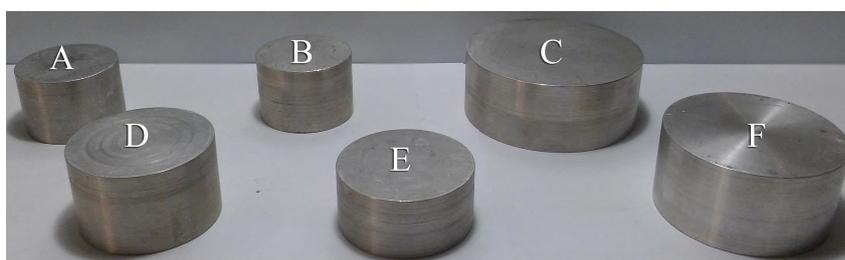
Verificada a necessidade da compensação, foram confeccionados mais cinco blocos de alumínio com as dimensões dos varistores tipo B, C, D, E e F. Na Figura 4.10 é visualizada a fotografia dos blocos de alumínio.

Figura 4.9 – Impulsos de corrente de manobra (30/60 μ s) e as respectivas tensões residuais medidas no varistor A2.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.10 – Fotografia dos blocos de alumínio ensaiados.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 4.11(a) é mostrada a fotografia do suporte isolante contendo o varistor de ZnO sob ensaio em série com o bloco metálico, nessa configuração a tensão é medida no varistor de ZnO. Após a aplicação do impulso de corrente e aquisição da tensão residual, as posições do bloco de alumínio e varistor são trocadas, e outro impulso de corrente com forma de onda e amplitude semelhante é aplicado novamente, dessa vez é medida a tensão residual no bloco metálico, como mostrado na fotografia 4.11(b).

Considerando que para cada impulso de corrente aplicado em cada um dos doze varistores de ZnO é aplicado outro no bloco metálico, e que para cada um dos quatro diferentes níveis de amplitude de corrente foram aplicados dois impulsos, para caracterizar a região

Figura 4.11 – Fotografia mostrando a medição de tensão: (a) No varistor de ZnO. (b) No bloco de alumínio.



(a)

(b)

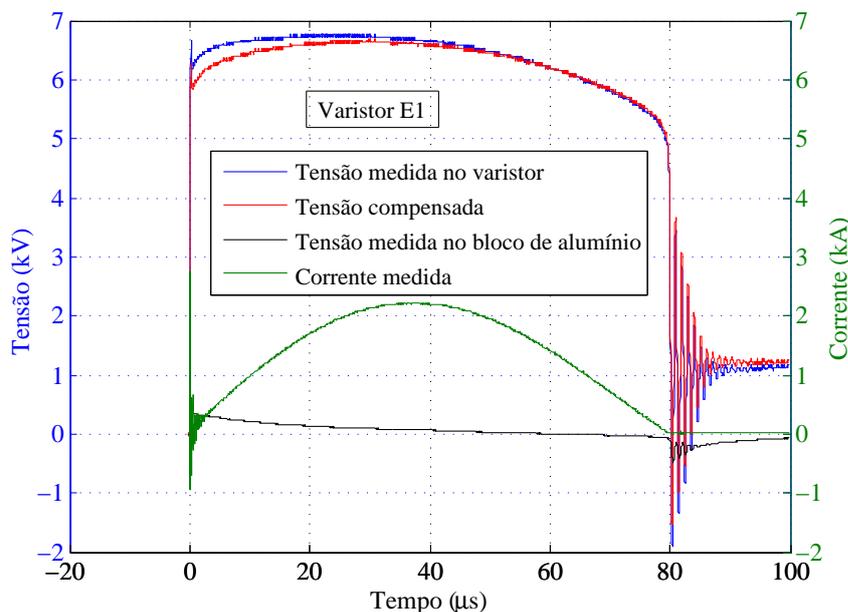
Fonte: Produzida pelo autor.

de alta não linearidade foram aplicados 192 impulsos de corrente de manobra. Para construção e validação do MEP escolheu-se um dos dois impulsos de corrente. O critério de escolha foi o menor erro de amplitude de corrente em relação aos níveis estabelecidos (250, 500, 1000 e 2000 A). Dessa forma, para construção e validação do modelo na região de alta não linearidade foram utilizados 80 impulsos de corrente de manobra.

Na Figura 4.12 são mostradas as formas de onda do impulso de corrente 30/60 μs e amplitude de 2 kA aplicado no varistor E1, as respectivas tensões residuais medidas no varistor e no bloco metálico e a tensão residual compensada. Observa-se que a tensão residual no bloco de alumínio é maior nos instantes iniciais à aplicação do impulso de corrente, em que há um maior di/dt , caracterizando um comportamento predominantemente indutivo. Esse comportamento também foi verificado nos demais varistores analisados. As oscilações de tensão observadas na Figura 4.12, verificadas após a corrente atingir valores próximos de zero ampères, foram atribuídas à resposta do gerador de impulso de corrente (trocas de energia entre os capacitores do gerador). Esse comportamento não foi considerado na construção do modelo, pois não envolve dissipação de energia no supressor de surto.

Com o objetivo de verificar a influência do material do bloco metálico no valor da tensão residual, o bloco de alumínio utilizado para compensar o acoplamento indutivo

Figura 4.12 – Impulsos de corrente de manobra (30/60 μs) e as respectivas tensões residuais medidas no varistor E1.



Fonte: Produzida pelo autor.

presente na medição da tensão residual dos varistores A1 e A2 foi substituído por um bloco de latão, com as mesmas dimensões. Não foram verificadas diferenças significativas na tensão residual. Isso sugere que a tensão residual medida não é influenciada pelo material metálico utilizado. De fato, o que as normas IEEE C62.11 (2012) e IEC 60099-4 (2014) exigem é que o material metálico utilizado não seja ferroso.

4.4 Ensaio de Caracterização dos Varistores de ZnO na Região de Altas Correntes

A região de altas correntes foi caracterizada pela aplicação de impulsos de corrente com tempos de frente entre 1 e 8 μs e amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA. Os tempos de frente e amplitudes de corrente foram escolhidos por representarem as descargas atmosféricas, na região de altas correntes. Além disso, buscou-se verificar a influência do tempo de frente do impulso de corrente no comportamento da tensão residual. Foram empregadas quatro diferentes formas de onda: 1,5/26 μs , 3/6 μs , 4/10 μs e 8/20 μs . Os impulsos de corrente foram gerados utilizando o mesmo gerador de impulso de corrente mostrado nas Figuras 4.6 e 4.7, cujo diagrama elétrico é visualizado na Figura 4.8.

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores dos elementos R , L e o número de estágios RC do gerador de impulso de corrente utilizado. Cada estágio possui um capacitor C de capacitância $2 \mu\text{F}$ e tensão suportável de 100 kV . Os valores $\approx 0,0 \Omega$ presentes na Tabela 4.4 referem-se à resistência de barras de alumínio colocadas em substituição aos resistores.

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores das tensões de carregamento dos capacitores, necessárias para gerar as quatro diferentes amplitudes de corrente dos impulsos $1,5/26 \mu\text{s}$, $3/6 \mu\text{s}$, $4/10 \mu\text{s}$ e $8/20 \mu\text{s}$.

Os doze varistores de ZnO foram submetidos a dois impulsos de corrente para cada um dos quatro valores de amplitude, e para as quatro diferentes formas de onda, totalizando 384 impulsos. As formas de onda dos impulsos de corrente e tensões residuais foram registradas e armazenadas, para serem utilizadas na construção e validação do MEP.

Na Figura 4.13(a) são visualizadas as formas de onda dos quatro diferentes impulsos de corrente atmosféricos com amplitude de aproximadamente 10 kA medidos no varistor A2, e na Figura 4.13(b) as respectivas tensões residuais. As oscilações em torno dos valores máximos de tensão e corrente, visualizadas na Figura 4.13, são ruídos durante a aquisição dos sinais, provavelmente originados por reflexões no sistema de aterramento do gerador de impulsos de corrente. As oscilações são mais acentuadas para impulsos de corrente com tempos de frente menores. Esse foi o motivo de não serem gerados impulsos de corrente com tempos de frente menores que $1,5 \mu\text{s}$. Uma melhoria na malha de aterramento, diminuindo o valor da resistência, diminuiria essas oscilações.

Tabela 4.4 – Valores dos elementos do gerador de impulso de corrente utilizados para gerar os impulsos de corrente $1,5/26 \mu\text{s}$, $3/6 \mu\text{s}$, $4/10 \mu\text{s}$ e $8/20 \mu\text{s}$.

Impulsos de Corrente	Número de Estágios	Resistores (Ω)	Indutor (μH)
$1,5/26 \mu\text{s}$	6,0	17,5	–
$3/6 \mu\text{s}$	1,0	$\approx 0,0$	0,885
$4/10 \mu\text{s}$	3,0	$\approx 0,0$	0,885
$8/20 \mu\text{s}$	4,0	$\approx 0,0$	5,7

Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 4.5 – Tensões de carregamento dos capacitores para gerar diversas amplitudes dos impulsos de corrente 1,5/26 μ s, 3/6 μ s, 4/10 μ s e 8/20 μ s.

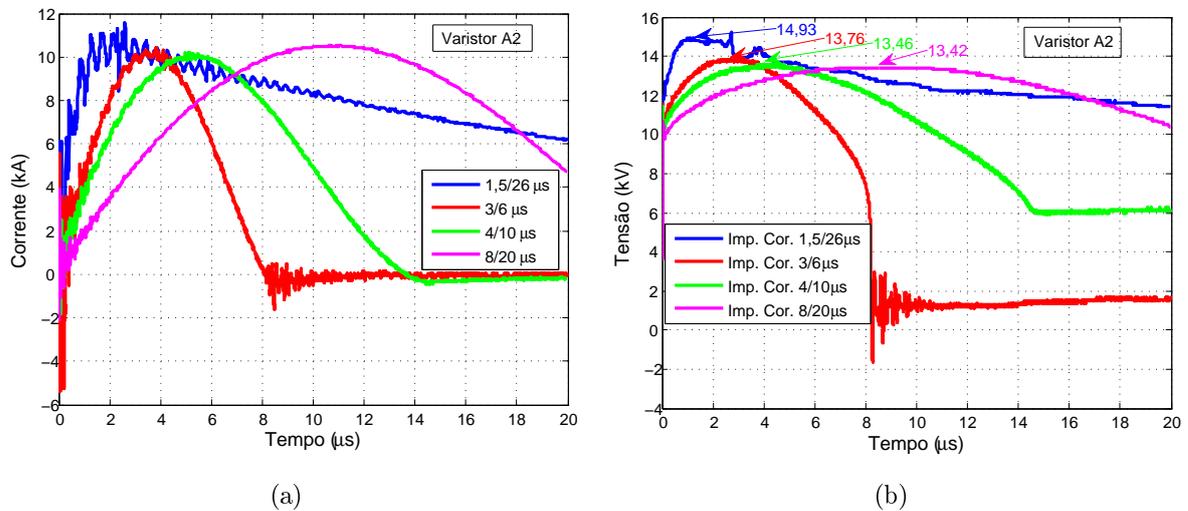
Impulsos de Corrente	Amplitude de corrente (kA)	Tensão de carregamento do(s) capacitor(es) (kV)						
		Tipos de varistores	A	B	C	D	E	F
1,5/26 μ s	4,0		21,0	20,0	17,0	17,5	17,0	18,0
	8,0		32,5	31,0	27,5	28,0	28,0	28,0
	10,0		38,5	36,0	32,0	32,5	33,0	33,0
	15,0		50,0	48,5	45,0	46,5	45,8	41,0
3/6 μ s	4,0		15,5	15,5	12,0	12,5	11,0	13,0
	8,0		21,0	21,0	17,5	18,0	17,0	18,0
	10,0		24,0	24,0	20,0	21,5	20,0	22,0
	15,0		30,0	30,0	26,0	28,0	26,0	28,0
4/10 μ s	4,0		13,0	12,5	9,5	10,0	9,0	10,5
	8,0		16,0	16,0	12,0	13,0	12,0	13,8
	10,0		18,0	17,0	13,5	15,0	13,0	15,0
	15,0		21,0	21,0	16,5	18,0	16,0	18,0
8/20 μ s	4,0		14,0	13,5	10,0	11,5	10,0	11,5
	8,0		18,0	18,0	14,0	15,5	14,5	16,0
	10,0		21,0	20,5	16,0	18,0	17,0	18,0
	15,0		26,0	25,0	20,0	22,0	21,0	22,0

Fonte: Produzida pelo autor.

Os valores de pico das tensões residuais medidas no varistor A2, quando submetido a quatro diferentes formas de onda de impulsos de corrente atmosféricos com amplitudes de aproximadamente 10 kA, conforme pode ser visto na Figura 4.13(b), evidenciam o efeito dinâmico do varistor de ZnO, em que o valor de pico da tensão residual é maior para tempos de frente de impulsos de corrente mais rápidos. Esse comportamento também foi observado para outros valores de amplitude de corrente e nos demais varistores.

A partir da Figura 4.13(b), tomando-se como referência o valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 8/20 μ s, determinou-se as variações percentuais em relação às outras formas de onda que são: 11,25% para 1,5/26 μ s, 2,53% para 3/6 μ s e 0,3% para 4/10 μ s. De acordo com IEEE Working Group 3.4.11 (1992), para os impulsos de corrente com tempos de frente na faixa de 0,5 a 4 μ s ou menos, as indutâncias parasi-

Figura 4.13 – Diferentes impulsos de corrente com amplitude de 10 kA e as respectivas tensões residuais medidas no varistor A2. (a) corrente. (b) tensão.



Fonte: Produzida pelo autor.

tas presentes no circuito de medição podem induzir tensões residuais muito superiores às produzidas pelo supressor de surto de ZnO. Nas medições registradas pelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992) foi verificado que o incremento da tensão residual é de apenas aproximadamente 6%, quando o tempo de frente do impulso de corrente é reduzido de 8 para 1,3 μ s. No mesmo trabalho, é relatado que dados antigos (os autores não definem a data) indicavam um aumento de 12%, o que concorda com os dados de medição (11,25%).

A partir dos resultados de medição das tensões residuais apresentados na Figura 4.13(b) e dos resultados de medições apresentados pelo IEEE Working Group 3.4.11 (1992), decidiu-se avaliar o acoplamento indutivo presente nas medições da tensão residual. Para isso, utilizou-se o mesmo método de compensação empregado na medição da tensão residual para o impulso de corrente de manobra, de acordo com as normas IEEE C62.11 (2012) e IEC 60099-4 (2014). Os valores de pico das tensões residuais no bloco metálico com dimensões iguais ao varistor A2 situaram-se entre 9 e 13% do valor de pico da tensão residual no varistor A2, o que de acordo com a norma IEC 60099-4 (2014) indica a necessidade da compensação da tensão residual.

Na Figura 4.14(a) são visualizadas as tensões residuais medidas no varistor A2 quando submetido às quatro diferentes formas de onda de impulsos de corrente apresentadas na Figura 4.13(a), com amplitudes de aproximadamente 10 kA. Na mesma figura são

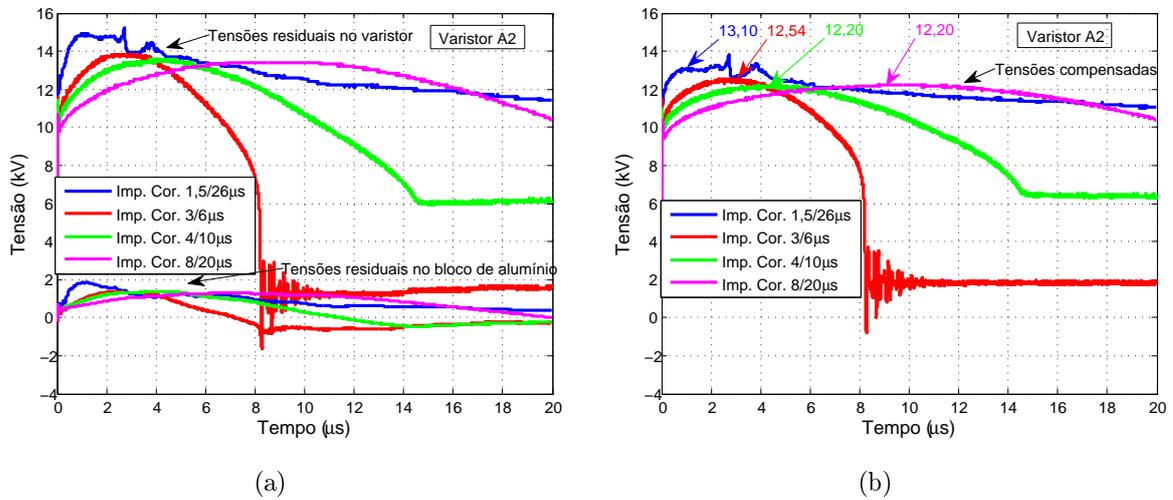
visualizadas as tensões residuais no bloco metálico (alumínio) com dimensões semelhantes ao varistor A2, cujas correntes conduzidas eram semelhantes em forma e amplitude às aplicadas no varistor A2. Já na Figura 4.14(b), são visualizadas as tensões residuais compensadas. Tomando-se novamente como referência o valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente $8/20 \mu\text{s}$, as variações percentuais em relação às outras formas de onda foram: 7,38% para $1,5/26 \mu\text{s}$, 2,79% para $3/6 \mu\text{s}$ e 0,0% para $4/10 \mu\text{s}$. Portanto, constata-se que as variações percentuais diminuíram significativamente. Para a forma de onda $1,5/26 \mu\text{s}$ diminuiu 4,37%. Em valores absolutos, mais de 1 kV para as quatro formas de onda avaliadas. Os demais varistores apresentaram comportamentos semelhantes. Os resultados ressaltam a importância da compensação na medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO, mesmo para frentes de onda mais lentas.

O valor de pico da tensão residual para impulso de corrente atmosférico ($8/20 \mu\text{s}$) com amplitude de 10 kA medida no varistor A2 sem compensação (13,4 kV) é muito próximo do valor indicado no *datasheet* do varistor tipo A (13,2 kV), apresentado na Tabela 4.2. Isso sugere que o fabricante do varistor tipo A não realizou a compensação da tensão residual. Com a compensação da tensão residual o valor de pico da tensão diminuiu para 12,2 kV. Dessa forma, o erro absoluto para esse impulso de corrente específico foi de 1 kV. É possível que o fabricante do varistor tipo A não tenha realizado a compensação por não ser exigido em norma.

Os modelos elétricos de supressores de surto de ZnO comumente empregados em simulações computacionais, a exemplo do modelo Convencional, utilizam os dados de medição expostos no *datasheet* do fabricante. Dessa forma, se os valores medidos possuem erros significativos, o supressor de surto não será representado corretamente nas simulações realizadas nos estudos sistêmicos e poderão ocorrer falhas na especificação do supressor de surto.

Para a caracterização dos varistores de ZnO na região de altas correntes, cada um dos doze varistores e os respectivos blocos de alumínio foram submetidos a dois impulsos de corrente, para cada um dos quatro diferentes níveis de amplitude, das quatro diferentes formas de onda, totalizando 768 impulsos de corrente.

Figura 4.14 – Tensões residuais medidas e compensadas. (a) medidas no varistor A2 e no bloco de alumínio. (b) Tensões residuais compensadas.



Fonte: Produzida pelo autor.

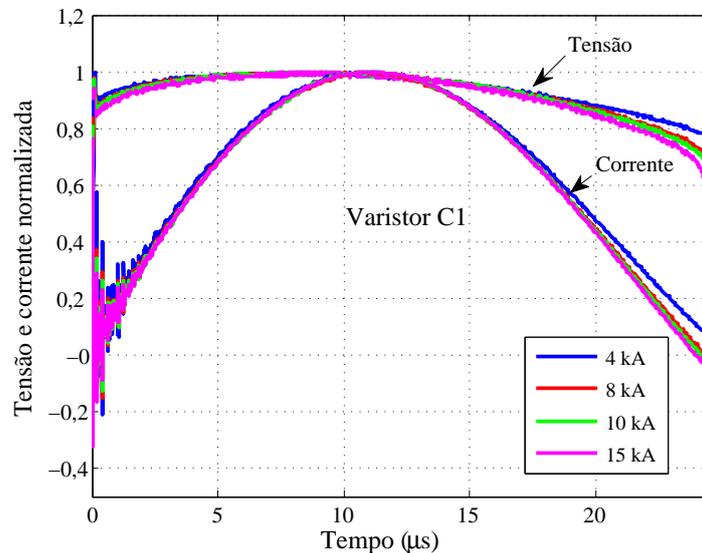
Para construção e validação do MEP, escolheu-se um dos dois impulsos de corrente aplicados no varistor e no respectivo bloco de alumínio, da mesma forma como foi feito com os dados de medição da tensão residual dos varistores submetidos a impulsos de corrente de manobra. O critério de escolha foi o menor erro de amplitude de corrente em relação aos níveis estabelecidos (4, 8, 10 e 15 kA). Dessa forma, para construção e validação do MEP na região de altas correntes foram utilizados 384 impulsos de corrente.

A partir das respostas de tensão dos cinco diferentes tipos de impulsos de corrente (1,5/26 μ s, 3/6 μ s, 4/10 μ s, 8/20 μ s e 30/60 μ s), constatou-se que o valor da amplitude do impulso de corrente não modifica a forma de onda da tensão residual. Na Figura 4.15 observa-se impulsos de corrente 8/20 μ s com amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA normalizados pelo seu valor máximo, medidos no varistor C1. As pequenas divergências observadas na cauda dos impulsos, deve-se ao gerador de impulso de corrente, cuja resposta de corrente é mais amortecida para menores valores de amplitude. Na mesma figura também observa-se as respectivas tensões residuais compensadas e normalizadas pelo seu valor máximo. O comportamento também é verificado nos outros varistores e para outras formas de onda. Vilar (2013) também verificou o mesmo comportamento.

Outra verificação obtida a partir dos dados de medição é que a forma de onda da tensão residual não depende, necessariamente, dos tempos de frente e de cauda do impulso de

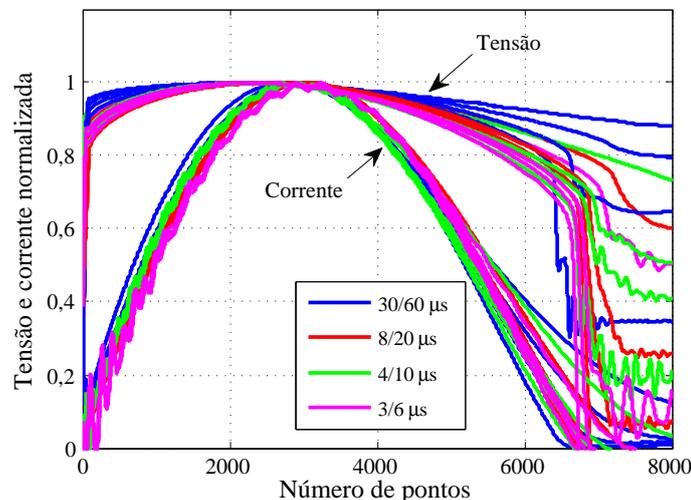
corrente, mas sim do comportamento da forma de onda desse impulso em função do tempo. Os impulsos de corrente medidos, $3/6 \mu\text{s}$, $4/10 \mu\text{s}$, $8/20 \mu\text{s}$ e $30/60 \mu\text{s}$ possuem formas de onda com comportamentos semelhantes. Decidiu-se então, calcular as curvas médias dos doze impulsos de corrente e tensão residual, para todos os níveis de amplitude de cada uma das quatro formas de onda citadas acima. Em seguida, essas formas de onda foram normalizadas e a base de tempo foi omitida, de forma que as curvas se aproximassem, conforme observado na Figura 4.16. As diferenças existentes nas caudas dos impulsos de corrente devem-se à resposta do gerador de impulso de corrente para diferentes amplitudes.

Figura 4.15 – Impulsos de corrente $8/20 \mu\text{s}$ e as respectivas tensões residuais normalizadas, medidas no varistor C1.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.16 – Impulsos de corrente e tensões residuais médias e normalizadas para quatro diferentes formas de onda e várias amplitudes de corrente.



Fonte: Produzida pelo autor.

Os resultados dos ensaios serviram de base de dados para construção, e posteriormente validação do MEP. No próximo capítulo é apresentado o MEP.

4.5 Ensaios de Verificação do Acoplamento Indutivo e da Influência do Invólucro do Supressor de Surto de ZnO na Medição da Tensão Residual

O método de compensação do acoplamento indutivo presente na medição da tensão residual descrito nas normas (IEEE C62.11, 2012) e (IEC 60099-4, 2014) foi aplicado aos varistores de ZnO avaliados. Espera-se que os resultados de medição da tensão residual após compensação representem a verdadeira característica elétrica dos varistores. É sabido, porém, que a tensão residual do supressor de surto contendo os vários varistores conectados em série é influenciada pelo tipo de seu invólucro, que pode ser de porcelana ou material polimérico. Nesta seção serão avaliados os níveis das tensões induzidas nas proximidades de um supressor de surto de distribuição quando submetido a uma descarga atmosférica padrão (8/20 μ s) com amplitude de aproximadamente 10 kA. Além disso, também será avaliada a influência do tipo de invólucro do supressor de surto na medição da tensão residual.

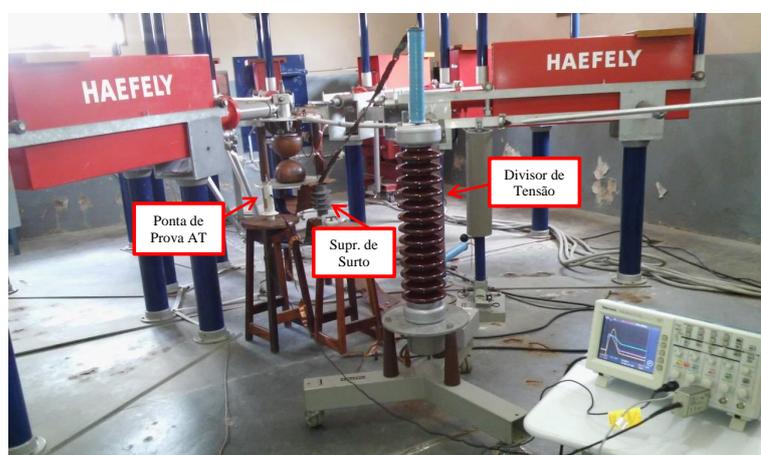
4.5.1 Ensaio de Verificação do Acoplamento Indutivo

Na verificação dos níveis de tensões induzidas nas proximidades do supressor de surto de ZnO foi utilizado como objeto teste um supressor de surto de distribuição com invólucro polimérico, tensão nominal de 12 kV_{RMS} e tensão MCOV de 10,2 kV_{RMS}. O supressor de surto foi submetido a impulsos de corrente atmosférica com forma de onda 8/20 μ s e amplitude de aproximadamente 10 kA. Para gerar o impulso de corrente foi utilizado o gerador existente no Laboratório de Alta Tensão da UFCG. A fotografia dos elementos do gerador é mostrada na Figura 4.17(a) e a representação do circuito elétrico é mostrada na Figura 4.17(b).

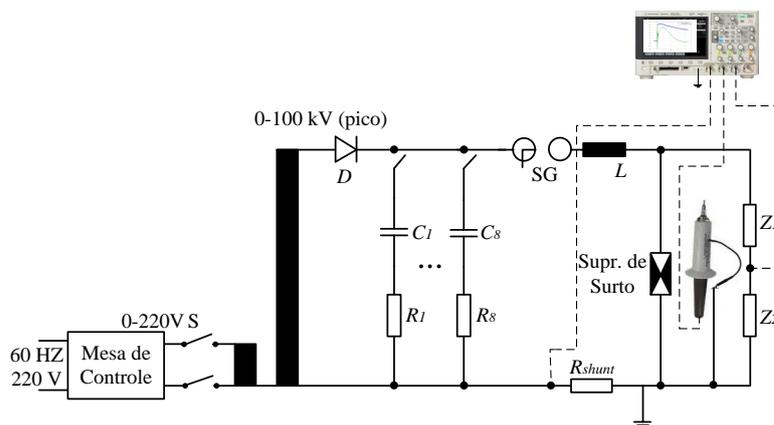
O circuito elétrico do gerador é similar ao mostrado na Fig 4.8, diferente em relação à medição de tensão. Para medição da tensão residual foi utilizado um divisor de alta tensão capacitivo e para medição da tensão induzida, uma ponta de prova de alta tensão.

Inicialmente, a ponta de prova de alta tensão foi posicionada a uma distância de 10 cm do lado direito do supressor de surto e em seguida dois impulsos de corrente foram aplicados ao supressor de surto, tendo as formas de onda do impulso de corrente, tensão no supressor de surto e tensão induzida registradas em um osciloscópio digital. O mesmo procedimento foi realizado para a distância de 20 cm do lado direito, 10 e 20 cm do lado esquerdo, 1 e 2 m de distância.

Figura 4.17 – Gerador de impulso de corrente do LAT-UFCG. (a) Diagrama esquemático do circuito do gerador de impulso de corrente e arranjo de medição. (b) Fotografia do gerador de impulso de corrente e arranjo de medição.



(a)



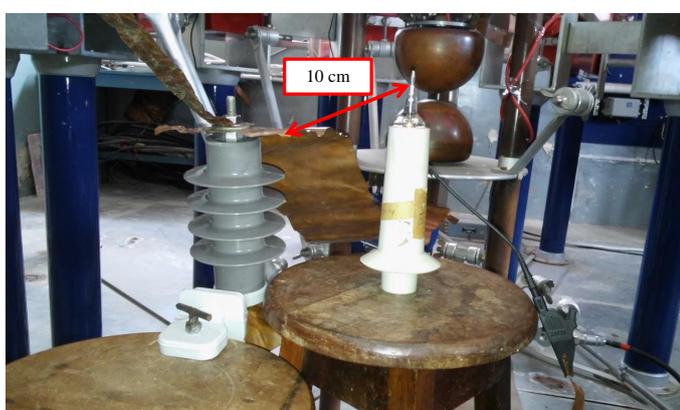
(b)

Fonte: Produzida pelo autor.

Nas Figuras 4.18(a) e 4.18(b) são visualizadas fotografias da ponta de prova de alta tensão posicionada a uma distância de 10 cm e 1 m do supressor de surto, respectivamente.

Após a realização dos ensaios foi iniciado o tratamento dos dados. As formas de onda dos dois impulsos de corrente aplicados ao supressor de surto e as respectivas tensões residuais e induzidas, para cada uma das diferentes distâncias de afastamento da ponta de prova de alta tensão, foram filtradas utilizando o filtro média móvel. O objetivo da utilização do filtro é a eliminação do ruído presente nos sinais, inerente ao processo de aquisição. Em seguida, a forma de onda média foi calculada.

Figura 4.18 – Fotografias mostrando o afastamento da ponta de prova de alta tensão em relação ao supressor de surto. Distância de: (a) 10 cm. (b) 1 m.



(a)



(b)

Fonte: Produzida pelo autor.

As Figuras 4.19(a) a 4.19(f) apresentam o comportamento médio das formas de onda do impulso de corrente, tensão residual no supressor de surto e tensão induzida, para cada uma das diferentes distâncias de afastamento da ponta de prova. Nota-se, como esperado, que há uma diminuição da tensão induzida à medida que a ponta de prova é afastada do supressor de surto. Além disso, observa-se nas Figuras 4.19(a) a 4.19(f) que a tensão

induzida possui distribuição praticamente uniforme, visto que ela decresce proporcionalmente à distância e os valores das tensões induzidas nos dois lados do supressor de surto, para uma mesma distância, possuem pouca variação. As pequenas diferenças podem ser atribuídas a variações nos valores de pico da corrente, imprecisão na medição da distância e desvio de simetria no posicionamento da ponta de prova.

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores de pico do impulso de corrente atmosférico, do valor de pico da tensão induzida, tensão residual e o percentual da tensão induzida em relação à tensão residual. Para a distância de 10 cm, os valores de pico da tensão induzida representam aproximadamente 22% da tensão residual, que no caso do supressor de surto de distribuição em análise, corresponde a um valor entre 6,2 e 6,7 kV. Conforme apresentado na Seção 4.3, com base em uma série de trabalhos acadêmicos, é possível que essa tensão induzida seja adicionada à medição da verdadeira tensão residual do supressor de surto de ZnO, e dessa forma ocorra erros de medição, o que resultará na incorreta especificação do supressor de surto.

Tabela 4.6 – Parâmetros de medição da tensão induzida.

Posição - Ponta AT	I_{pico} (kA)	TR (kV)	TI (kV)	TI/TR $\times 100$ (%)
LD - 10 cm	9,61	30,11	6,68	22,18
LE - 10 cm	9,78	29,20	6,27	21,47
LD - 20 cm	9,62	30,30	4,39	14,49
LE - 20 cm	9,46	29,41	3,71	12,61
1 m	9,75	30,31	0,95	3,13
2 m	9,48	30,61	0,53	1,73

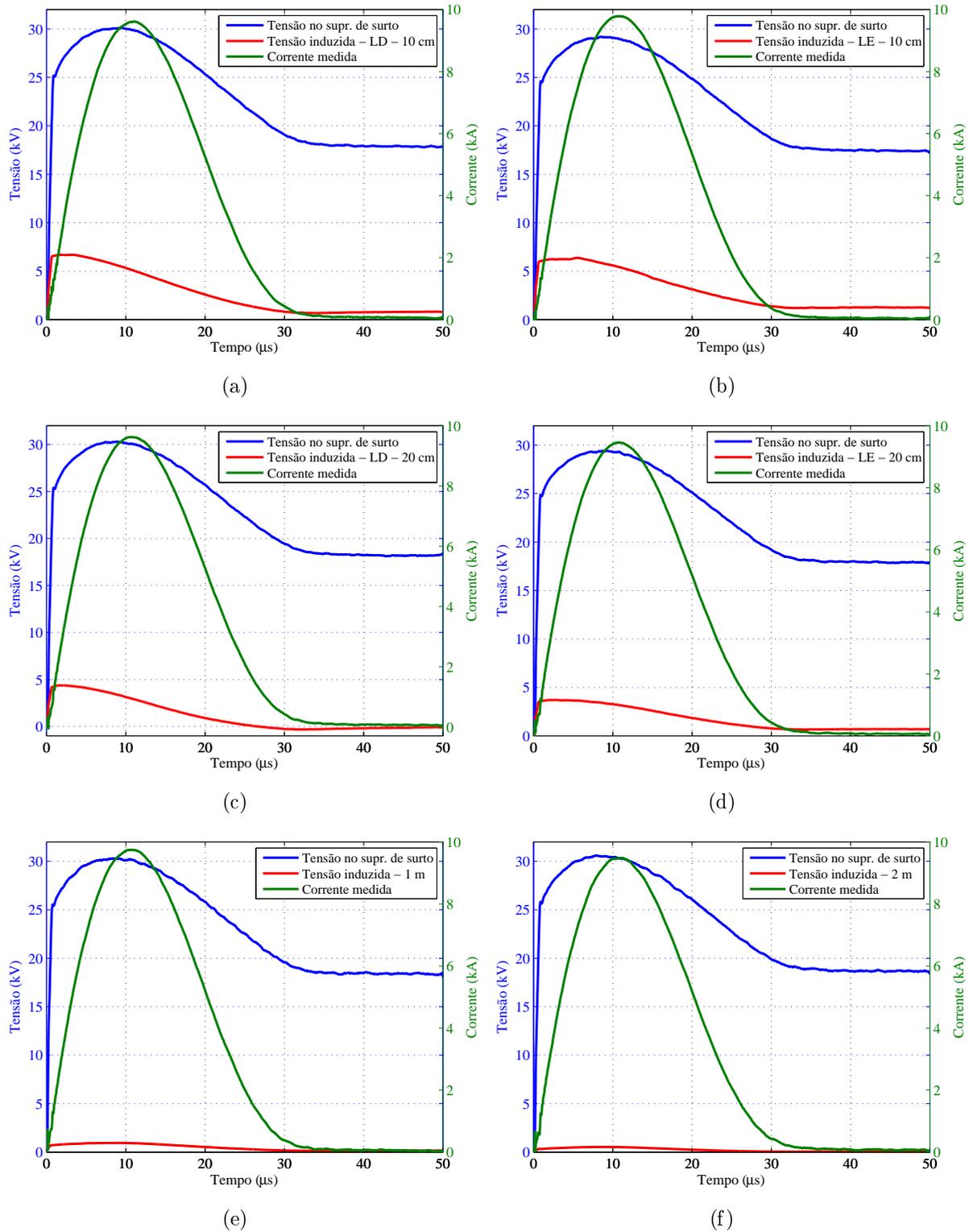
Legenda: TR - Tensão Residual; TI - Tensão Induzida.

Fonte: Produzida pelo autor.

Embora a descarga atmosférica possa provocar diversos tipos de acoplamentos eletromagnéticos, é possível concluir a partir das Figuras 4.19(a) a 4.19(d) que para distâncias pequenas em relação ao ponto de injeção de corrente, no caso em análise de 10 e 20 cm, há uma predominância da tensão induzida devido ao acoplamento magnético. Essa afirmação deve-se ao fato dos picos das tensões induzidas para essas distâncias estarem bastante adiantados dos picos das correntes, caracterizando a predominância da componente indutiva. Já para as distância de 1 e 2 m, observa-se uma diminuição do atraso da corrente em relação à tensão, possivelmente devido à contribuição de outras componentes, como

ao acoplamento elétrico de natureza capacitiva.

Figura 4.19 – Tensões e correntes medidas no supressor de surto de distribuição e em suas proximidades. Tensões induzidas medidas no: (a) Lado direito - 10 cm; (b) Lado esquerdo - 10 cm; (c) Lado direito - 20 cm; (d) Lado esquerdo - 20 cm; (e) 1 m; (f) 2 m.



Fonte: Produzida pelo autor.

A análise dos resultados de medição evidencia a predominância da tensão induzida devido ao acoplamento magnético para regiões próximas ao supressor de surto, e que à medida que se distancia do ponto de injeção da descarga de corrente há uma menor contribuição desse acoplamento e da amplitude da tensão induzida.

Os elevados valores de tensões induzidas medidos nas proximidades dos supressores de surto de ZnO alerta para a necessidade de considerar a presença do acoplamento indutivo na medição da tensão residual. Dessa forma, incentiva a busca de procedimentos que minimizem ou compensem o acoplamento indutivo, de modo a obter o real comportamento elétrico do supressor de surto de ZnO.

4.5.2 Ensaio de Verificação da Influência do Invólucro do Supressor de Surto de ZnO na Medição da Tensão Residual

A função do invólucro é proporcionar a estanqueidade do supressor de surto, evitando que a umidade e impurezas penetrem em seu interior, o que causaria a degradação prematura dos varistores de ZnO.

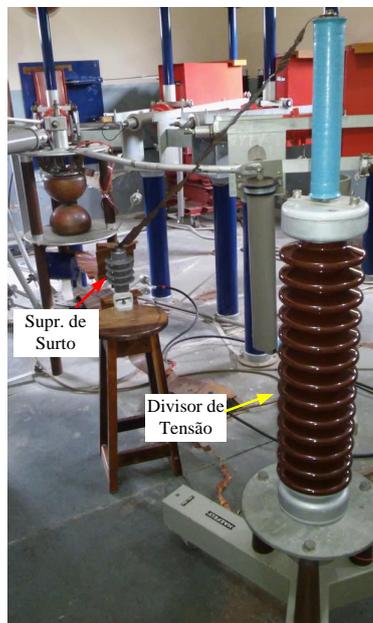
O invólucro é um componente do supressor de surto. Dessa forma, tanto a composição do material quanto a configuração do invólucro podem influenciar no valor da tensão residual. Com objetivo de avaliar essa influência foram realizados ensaios com o mesmo supressor de surto de distribuição com revestimento polimérico apresentado na seção anterior e visualizado na Figura 4.20(a).

Utilizando o gerador de impulsos de corrente do Laboratório de Alta Tensão da UFCG foram aplicados ao supressor de surto polimérico impulsos de corrente com forma de onda $8/20 \mu\text{s}$ e amplitudes de 2, 4, 8 e 10 kA. As formas de onda do impulso de corrente e da respectiva tensão residual foram registradas com auxílio de um osciloscópio digital. Foram aplicados dois impulsos de corrente para cada uma das quatro diferentes amplitudes, em seguida foram calculadas as formas de onda médias. O circuito elétrico do gerador é similar ao apresentado na Figura 4.6(b), exceto a ponta de prova de alta tensão. Na Figura 4.20(b) é mostrada uma fotografia do supressor de surto e do divisor de tensão utilizado para medir a tensão residual.

Figura 4.20 – Ensaio em supressor de surto com invólucro de material polimérico. (a) Supressor de surto com invólucro de material polimérico. (b) Supressor de surto e divisor de tensão.



(a)



(b)

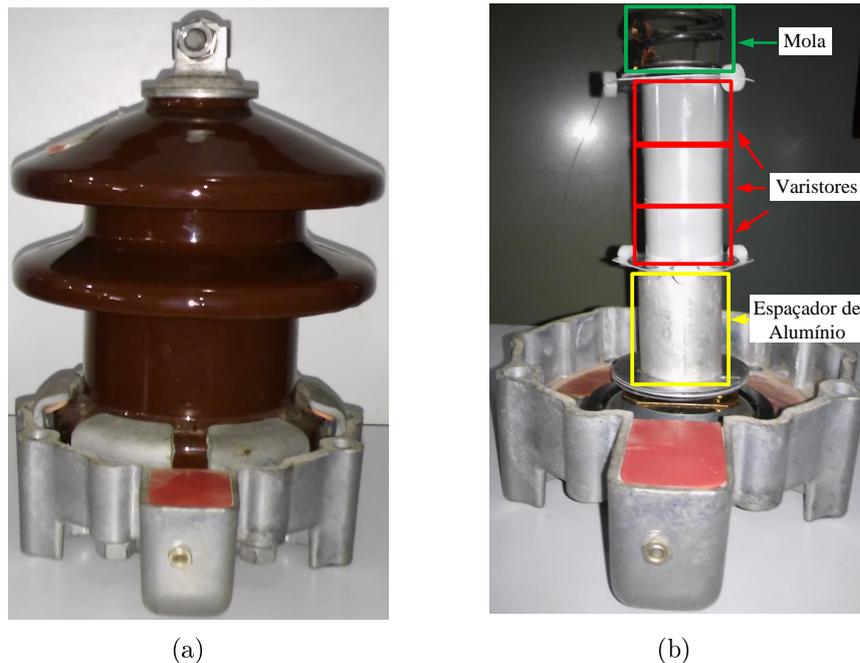
Fonte: Produzida pelo autor.

Após a finalização dos ensaios, o supressor de surto com revestimento polimérico foi aberto, e em seu interior existiam três varistores de ZnO conectados em série. Entre o material polimérico e o varistor existia uma densa camada de fibra de vidro impregnada com resina que é utilizada para proporcionar uma maior resistência mecânica ao supressor de surto e também auxilia na preservação da estanqueidade. Em seguida, os varistores foram instalados em série, no interior de um invólucro de porcelana.

Na Figura 4.21(a) é mostrado o invólucro de porcelana e na Figura 4.21(b) o arranjo dos varistores sem a porcelana. Além dos varistores observa-se na Figura 4.21(b) a existência de outros componentes estruturais, como a mola e espaçador de alumínio. A mola é utilizada para melhorar o contato elétrico entre a coluna de varistores localizada no interior do invólucro e o terminal de alta tensão localizado na parte externa. O espaçador de alumínio é utilizado para garantir a altura e conseqüentemente a tensão suportável do invólucro, além de uma melhor distribuição de campo elétrico. Entre a coluna de varistores e o invólucro de porcelana existe um espaço de ar atmosférico.

O supressor de surto com invólucro de porcelana foi submetido aos mesmos ensaios realizados com o supressor de surto polimérico. As formas de onda dos impulsos de corrente e da tensão residual também foram registradas com auxílio de um osciloscópio digital.

Figura 4.21 – Supressor de surto de ZnO. (a) Com invólucro de porcelana. (b) Sem invólucro de porcelana.



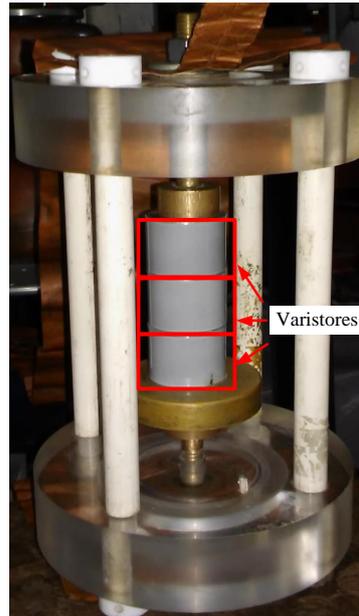
Fonte: Produzida pelo autor.

Ao término dos ensaios, os varistores foram removidos do invólucro de porcelana e empilhados em série em um suporte isolante, conforme mostrado na Figura 4.22. Na sequência, os varistores foram submetidos aos mesmos ensaios realizados com o revestimento polimérico e de porcelana. Novamente, as formas de onda do impulso de corrente e tensão residual foram registradas.

Na Figura 4.23 são mostradas as formas de onda médias dos impulsos de corrente e das respectivas tensões residuais medidas nos varistores com invólucro polimérico (supressor de surto de distribuição), de porcelana e sem invólucro. Nota-se uma significativa diferença nas amplitudes das tensões residuais, porém as formas de onda praticamente não alteram. O comportamento das formas de onda das tensões residuais medidas nos varistores com invólucros é semelhante às tensões residuais medidas sem invólucro, porém com adição

de um determinado nível de tensão contínua. Essa tensão contínua pode ser oriunda das capacitâncias parasitas existentes entre os varistores de ZnO e seu invólucro, e entre o invólucro e o potencial de terra. A amplitude da tensão residual é maior para o invólucro de porcelana.

Figura 4.22 – Suporte isolante contendo três varistores de ZnO conectados em série.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Tabela 4.7 são mostrados os valores de pico das tensões residuais medidas no supressor de surto com invólucro de porcelana ($TR_{porc.}$), no supressor de surto com invólucro polimérico ($TR_{pol.}$) e nos varistores sem invólucro ($TR_{var.}$), quando submetidos a amplitudes de 2, 4, 8 e 10 kA. Também são apresentadas as diferenças percentuais entre as tensões residuais medidas: no supressor de surto com invólucro de porcelana e varistores ($DIF_{porc.-var.}$), no supressor de surto com invólucro de porcelana e supressor de surto polimérico ($DIF_{porc.-pol.}$) e no supressor de surto polimérico e varistores ($DIF_{pol.-var.}$). As diferenças percentuais foram calculadas utilizando as Equações 4.1 a 4.3.

$$DIF_{porc.-var.} = \frac{TR_{porc.} - TR_{var.}}{TR_{var.}} \cdot 100\%. \quad (4.1)$$

$$DIF_{porc.-pol.} = \frac{TR_{porc.} - TR_{pol.}}{TR_{pol.}} \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

$$DIF_{pol.-var.} = \frac{TR_{pol.} - TR_{var.}}{TR_{var.}} \cdot 100\%. \quad (4.3)$$

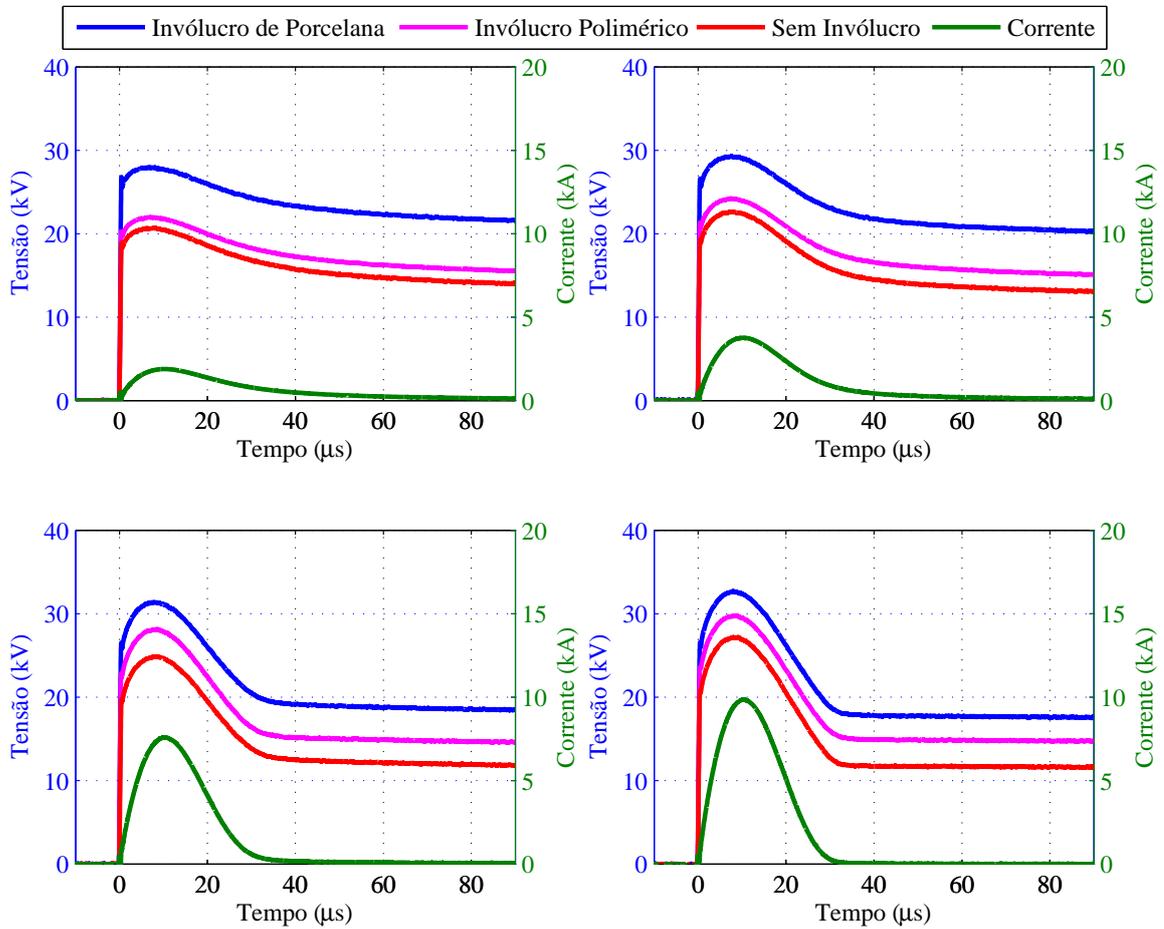
Conforme pode ser observado na Tabela 4.7 as diferenças dos valores de pico das tensões residuais para as três situações são expressivas, principalmente quando o valor de pico da tensão residual no supressor de surto com invólucro de porcelana é comparado com o valor de pico da tensão residual nos varistores sem invólucro. Neste caso, a diferença percentual atingiu o valor de 35,07% quando as amostras foram submetidas ao impulso de corrente com amplitude de 2 kA. Também foram significativas as diferenças percentuais entre os supressores de surto com invólucro de porcelana e material polimérico, atingindo o valor de 27,26% para a amplitude de 2 kA. Observa-se também que nos casos das diferenças percentuais entre o supressor de surto com invólucro de porcelana e os varistores, e entre o supressor de surto com invólucro de porcelana e o supressor de surto polimérico, a diferença percentual diminui com o aumento da amplitude da corrente. Já no caso da diferença percentual entre o supressor de surto polimérico e os varistores, esse comportamento não é observado.

A diminuição da diferença percentual com o aumento da amplitude de corrente pode estar relacionada com o expressivo aumento da componente resistiva da forma de onda da tensão residual em relação à componente capacitiva associada às capacitâncias parasitas. Isso ocorre devido à não linearidade dos varistores, visto que a resistência diminui com o aumento da tensão ou corrente.

Os resultados de medição apresentados na Seção 4.5 evidenciam a existência de significativos níveis de tensões induzidas nas proximidades dos supressores de surto de ZnO quando submetidos a descargas atmosféricas. Evidenciam também que o invólucro do supressor de surto de ZnO é responsável por adicionar um nível de tensão contínua na medição da tensão residual, sendo o invólucro de porcelana responsável por adicionar uma tensão maior que o invólucro de material polimérico.

Os resultados apresentados na Seção 4.5 são preliminares, necessitando de mais ensaios para validação, porém, advertem para erros elevados, caso a tensão induzida na medição da tensão não seja minimizada ou compensada, ou o invólucro do supressor de surto não seja considerado.

Figura 4.23 – Formas de onda médias das correntes e tensões residuais medidas em um supressor de surto de distribuição com diferentes invólucros submetidos a diferentes amplitudes de corrente.



Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 4.7 – Comparação entre as tensões residuais medidas em varistores de ZnO com invólucro de material polimérico, de porcelana e sem invólucro.

I_{pico} (kA)	$TR_{porc.}$ (kV)	$TR_{pol.}$ (kV)	$TR_{var.}$ (kV)	$DIF_{porc.-var.}$ (%)	$DIF_{porc.-pol.}$ (%)	$DIF_{pol.-var.}$ (%)
2	27,96	21,97	20,70	35,07	27,26	6,13
4	29,29	24,22	22,63	29,43	20,93	7,03
8	31,38	28,14	24,87	26,18	11,51	13,15
10	32,70	29,76	27,20	20,22	9,88	9,41

Fonte: Produzida pelo autor.

Capítulo 5

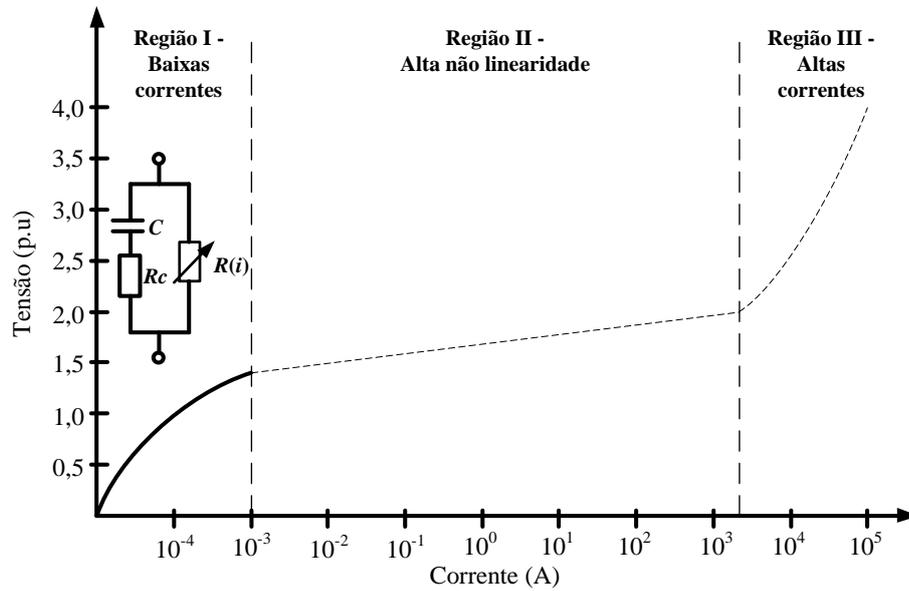
Modelo Elétrico Proposto

Neste capítulo são apresentados os procedimentos empregados na construção do Modelo Elétrico Proposto (MEP), aplicável às três regiões de operação do supressor de surto de ZnO, caracterizando o uso para uma ampla faixa de operação. O modelo é baseado em dados de medição de tensão e corrente em doze varistores de ZnO. Durante o processo de construção do modelo, foram desenvolvidos e otimizados quatro modelos elétricos, para diferentes regiões de operação. Em seguida, os quatro modelos foram simplificados e reunidos em um único, formando o MEP, de modo que os parâmetros otimizados para uma região de operação não interferissem nas outras regiões.

5.1 Modelo Elétrico para Região de Baixas Correntes

O modelo elétrico de supressor de surto de ZnO idealizado para região de baixas correntes é mostrado na Figura 5.1. Na mesma figura é apresentada a curva $V-I$ típica. A resistência não linear $R(i)$ representa as perdas ôhmicas; C é a capacitância associada às camadas intergranulares do varistor de ZnO; R_c é uma resistência de amortecimento, cuja função é suprimir possíveis oscilações numéricas espúrias. Para o cálculo da resistência R_c foi adotada a expressão $R_c = 0,15 \times \frac{\Delta t}{2C}$, sugerida por Alvarado et al. (1983), em que R_c é o valor da resistência, Δt é o passo de cálculo da simulação e C é o valor da capacitância do modelo.

Figura 5.1 – Curva V - I típica e modelo de supressor de surto de ZnO idealizado para região de baixas correntes.



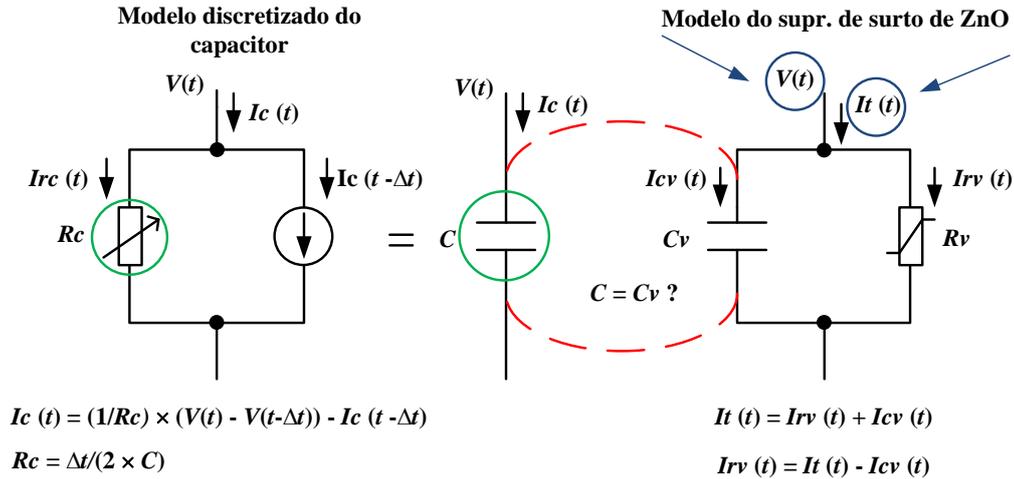
Fonte: Produzida pelo autor.

Para determinar a curva V - I de $R(i)$ e a capacitância C se faz necessário estimar as componentes resistiva e capacitiva da corrente de fuga total do supressor de surto, para vários pontos de operação na região de baixas correntes. Na Figura 5.2 é esquematizada a técnica computacional utilizada na estimação das componentes da corrente de fuga. A estimação é baseada na decomposição da corrente de fuga. Para realizar a decomposição é necessário determinar a capacitância do supressor de surto de ZnO. Para isso, é utilizado o pressuposto de que a componente resistiva da corrente de fuga está em fase com a tensão aplicada ao supressor de surto, e um método de otimização para realizar o ajuste da capacitância automaticamente (BRITO, 2013). O método de otimização empregado neste trabalho foi o utilizado por Brito (2013), o método de otimização de Levenberg-Marquardt. Na Figura 5.3 é apresentado um fluxograma simplificado do método de decomposição.

Ao aplicar o método de decomposição da corrente de fuga é possível verificar que o valor da capacitância modifica em função do valor da tensão aplicada, ou seja, a capacitância é não linear. O comportamento não linear da capacitância já foi comprovado por outros autores (MORAES, 1987; HADDAD; WARNE, 2004; BARBOSA, 2007). Entretanto, para simplificar o modelo, o valor da capacitância foi considerado fixo. O valor corresponde

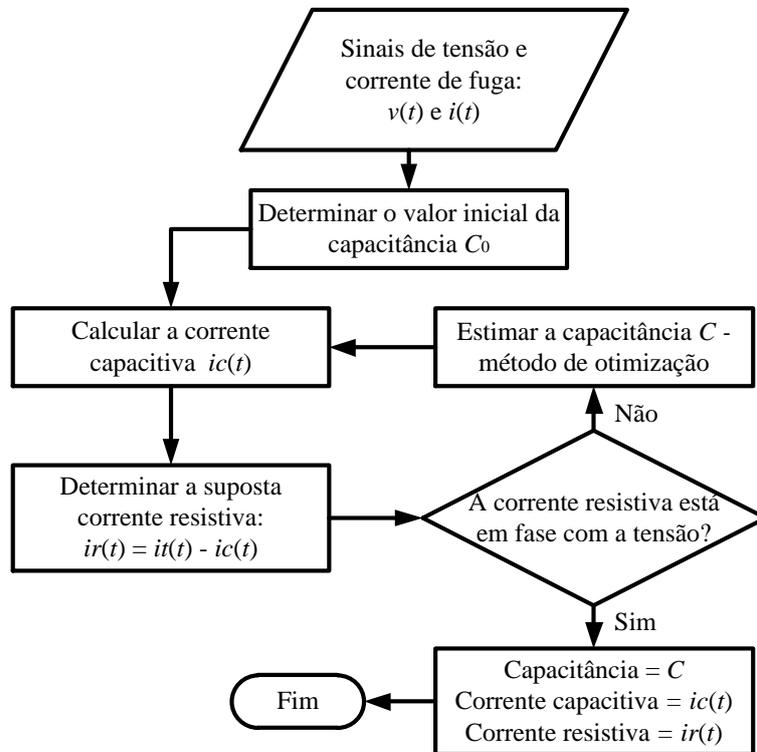
à capacitância do supressor de surto na tensão MCOV (Máxima Tensão de Operação Contínua). O supressor de surto de ZnO está submetido à tensão de operação do sistema elétrico na maior parte do seu tempo de vida útil.

Figura 5.2 – Diagrama esquemático da técnica computacional utilizada na decomposição da corrente de fuga.



Fonte: (BRITO, 2013).

Figura 5.3 – Fluxograma do método de decomposição da corrente de fuga proposto por Brito (2013).



Fonte: Adaptada de Brito (2013).

5.2 Modelo Elétrico para Região Altamente Não Linear

Quando o supressor de surto de ZnO é submetido a sobretensões sustentadas ou a sobretensões de manobra, ele opera na região de alta não linearidade de sua curva característica $V-I$. Contudo, devido ao seu comportamento elétrico, a resposta do supressor de surto para cada solicitação é diferente, assim, dois modelos foram propostos para representar a região de alta não linearidade.

Na região da curva característica $V-I$ onde se representa as sobretensões sustentadas (frequência industrial), a componente resistiva da corrente de fuga é muito superior à componente capacitiva. Dessa forma, o supressor de surto pode ser representado apenas por uma resistência não linear, como apresentado na Figura 5.4.

Quando os supressores de surto são submetidos a sobretensões de manobra, eles conduzem corrente com formas de onda na faixa de dezenas de microssegundos, e geralmente com amplitudes de algumas dezenas ou centenas de ampères. Devido as suas características, as correntes oriundas de manobra apresentam elevado di/dt e este fenômeno é comumente representado, nos modelos elétricos, por uma indutância.

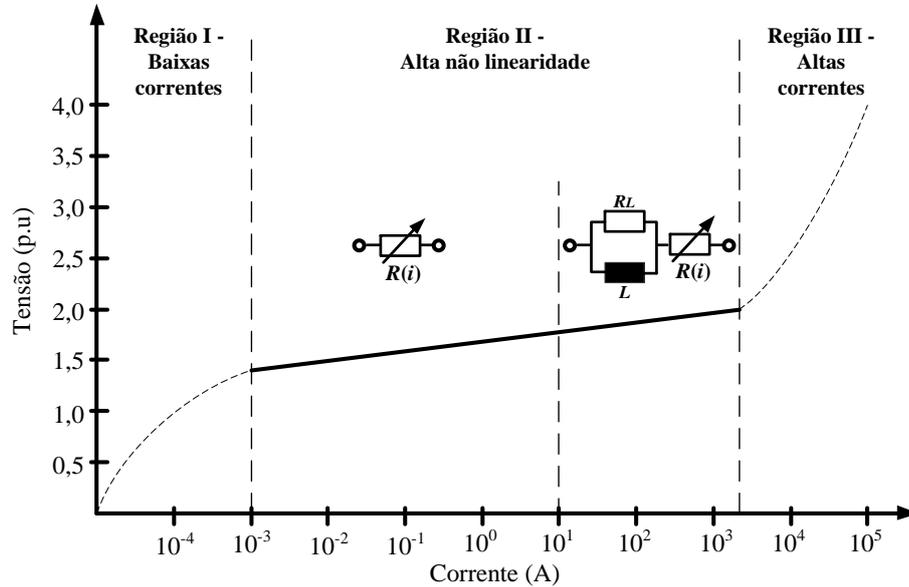
O efeito da não linearidade do supressor de surto é emulado por resistência não linear. Nos ensaios experimentais foi comprovado o atraso do pico da corrente em relação ao pico da tensão. Assim, com o intuito de representar o atraso, adicionou-se uma indutância em série com a resistência não linear para representar de forma plena os transitórios de manobra, conforme mostrado na Figura 5.4.

A indutância linear foi dimensionada com base na altura do supressor de surto e o valor de $1 \mu\text{H}/\text{m}$ foi utilizado. Esse é um valor típico da indutância em supressores de surto de ZnO, utilizado também nos modelos desenvolvidos por Schmidt et al. (1989), Hileman et al. (1990), Hagiwara et al. (1997).

A resistência de amortecimento R_L é adicionada em paralelo com a indutância L . O motivo é o mesmo que apresentado anteriormente para a inserção da resistência em série com o capacitor, evitar possíveis oscilações numéricas espúrias. Alvarado et al. (1983) sugerem utilizar a expressão $R_L = \frac{20}{3} \times \frac{2L}{\Delta t}$ para o cálculo da resistência, em que R_L é o valor da resistência, Δt é o passo de cálculo da simulação e L é o valor da indutância do

modelo. Testou-se vários valores para o cálculo de R_L , sendo adotada a expressão $R_L = \frac{8L}{\Delta t}$.

Figura 5.4 – Curva $V-I$ típica e modelos de supressores de surto de ZnO idealizados para região de alta não linearidade.



Fonte: Produzida pelo autor.

5.3 Modelo Elétrico para Região de Altas Correntes

Na presença de sobretensões atmosféricas, o supressor de surto de ZnO opera na região de altas correntes. Nesta região, o supressor de surto pode conduzir correntes na ordem de quiloampères. Da mesma forma que na região de alta não linearidade, a componente resistiva da corrente de fuga é muito superior à componente capacitiva, não sendo necessária a representação da capacitância do supressor de surto.

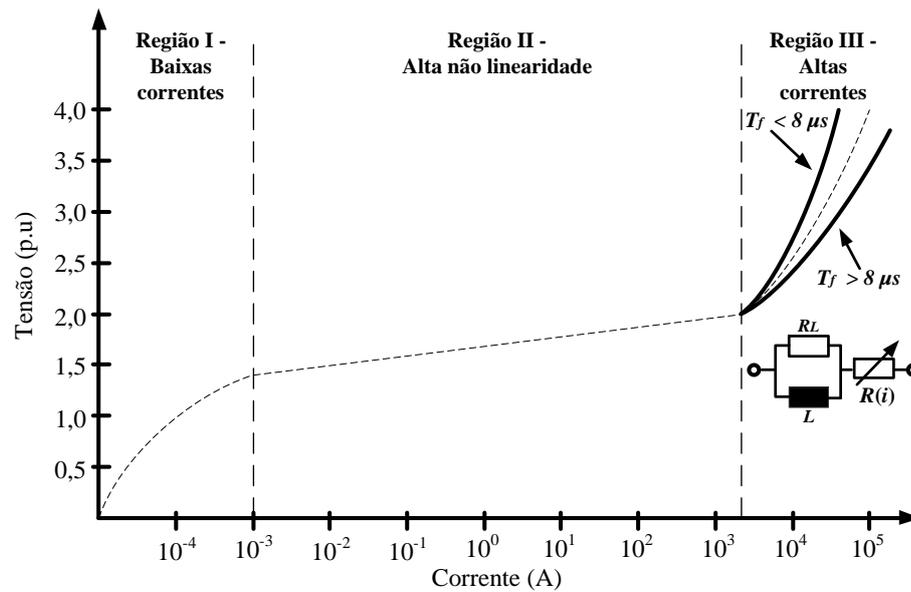
As medições em laboratório (KIM et al., 1996; LIRA et al., 2012; BRITO, 2013) evidenciaram que o valor de pico do impulso de corrente está atrasado do valor de pico da tensão residual para impulsos de corrente atmosféricos. Dessa forma, é necessário incluir no modelo uma indutância.

Além disso, vários autores (TOMINAGA et al., 1979; IEEE Working Group 3.4.11, 1992; KIM et al., 1996) relataram o efeito dinâmico do supressor de surto de ZnO, em que se observa uma elevação na tensão com a diminuição do tempo de frente do impulso de corrente. Essa característica foi modelada por Tominaga et al. (1979) por uma indutância

linear que depende da amplitude e tempo de frente do impulso de corrente; e por Kim et al. (1996), por uma indutância não linear. Portanto, ambos sugerem uma não linearidade da indutância. Entretanto, o valor de indutância do modelo proposto por Tominaga et al. (1979) diminui à medida que a amplitude da corrente aumenta. Este comportamento não corresponde ao comportamento elétrico esperado. Já os erros percentuais fornecidos pelo modelo proposto por Kim et al. (1996) foram altos, quando comparados com erros de outros modelos, com exceção do impulso de corrente de frente rápida ($1/2 \mu s$). Decidiu-se então, representar o efeito dinâmico pelo deslocamento da curva $V-I$, mudança na resistência não linear. A resistência aumenta com a diminuição do tempo de frente do impulso de corrente.

Dessa forma, o supressor de surto de ZnO operando na região de altas correntes é representado como mostrado na Figura 5.5. Os valores da indutância L e resistência de amortecimento R_L são calculados da mesma forma que para a região de alta não linearidade. Já o valor da resistência $R(i)$, depende do tempo de frente do impulso de corrente. A mudança da curva $V-I$ de acordo com o tempo de frente do impulso de corrente é representada na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Curva $V-I$ típica e modelo de supressor de surto de ZnO idealizado para região de altas correntes.



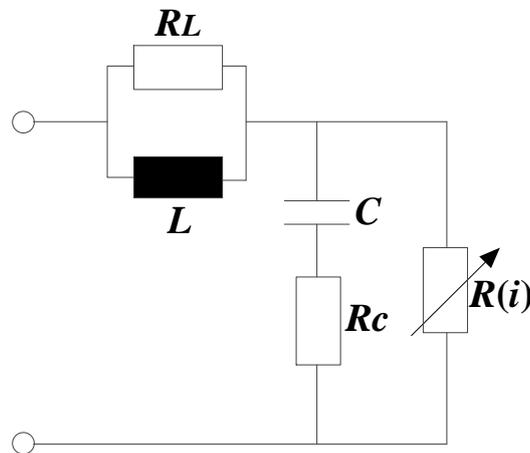
Fonte: Produzida pelo autor.

5.4 Modelo Elétrico Proposto

O Modelo Elétrico Proposto (MEP) mostrado na Figura 5.6, foi construído com base nos modelos elétricos idealizados para cada uma das três regiões de operação do supressor de surto de ZnO, apresentados nas seções anteriores. Os valores dos parâmetros L , R_L e R_C são os mesmos apresentados nos modelos idealizados para cada região de operação, ou seja, $R_L=1 \mu\text{H/m}$; $R_L=\frac{8L}{\Delta t}$ e $R_c=0,15 \times \frac{\Delta t}{2C}$. Portanto, falta determinar os valores dos parâmetros C e $R(i)$.

Os parâmetros C e $R(i)$ são essenciais para a correta representação do supressor de surto de ZnO. Eles foram determinados a partir dos resultados de medição de tensão e corrente nos doze varistores de ZnO, nas três regiões de operação. O parâmetro C foi determinado a partir dos resultados de medição na região de baixas correntes. Já o parâmetro $R(i)$, a partir dos resultados de medição nas três regiões de operação. A seguir, são apresentados os procedimentos empregados na determinação dos parâmetros C e $R(i)$.

Figura 5.6 – Modelo elétrico proposto.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na região de baixas correntes, os varistores foram submetidos a diversos níveis de tensão, e para cada diferente nível de tensão, registrou-se as formas de onda da tensão aplicada e da respectiva corrente de fuga. Em seguida, foi aplicado o método de decomposição da corrente de fuga em supressores de surto de ZnO proposto por Brito (2013),

denominado de método da estimação da capacitância. E depois, os valores das capacitâncias em função da tensão foram obtidos. A curva $C-V$ é obtida através da interpolação linear do valor de pico da tensão com o valor da capacitância.

A representação da capacitância no modelo é essencial na região de baixas correntes. A partir das curvas $C-V$ apresentadas na Figura 5.7 e das dimensões físicas dos varistores avaliados, apresentadas no Capítulo 4, verificou-se que a capacitância do varistor está diretamente associada a seu diâmetro. Contudo, o diâmetro do varistor é um parâmetro não comumente divulgado pelos fabricantes, inviabilizando o seu uso.

Por outro lado, o fabricante ABB (ABB, 2011) correlacionou o diâmetro do varistor com a classe de descarga em linha dos supressores de surto de ZnO, conforme mostrado na Tabela 5.1. Ademais, é razoável admitir que o diâmetro dos varistores de outros fabricantes difere muito pouco dos apresentados pela ABB. Assim, com essa suposição, pode-se agora associar a classe de descarga em linha à sua capacitância. Desse modo, com base nos valores de diâmetros apresentados na Tabela 5.1, pode-se associar os varistores ensaiados com uma classe de descarga em linha dos supressores de surto. Na Figura 5.7 são mostradas as curvas características das capacitâncias versus tensão para os doze varistores ensaiados e a respectiva definição da classe de descarga em linha.

Tabela 5.1 – Correlação entre o diâmetro dos varistores da ABB e a classe de descarga em linha e corrente nominal de descarga.

Classe de descarga em linha	-/-*	1	2	2	3	4	5
Corrente nominal de descarga I_n (kA)	5	10	10	10	10	20	20
Diâmetro do varistor (mm)	38	38	42	47	62	75	108

*Sem classe de descarga em linha

Fonte: Adaptada de ABB (2011).

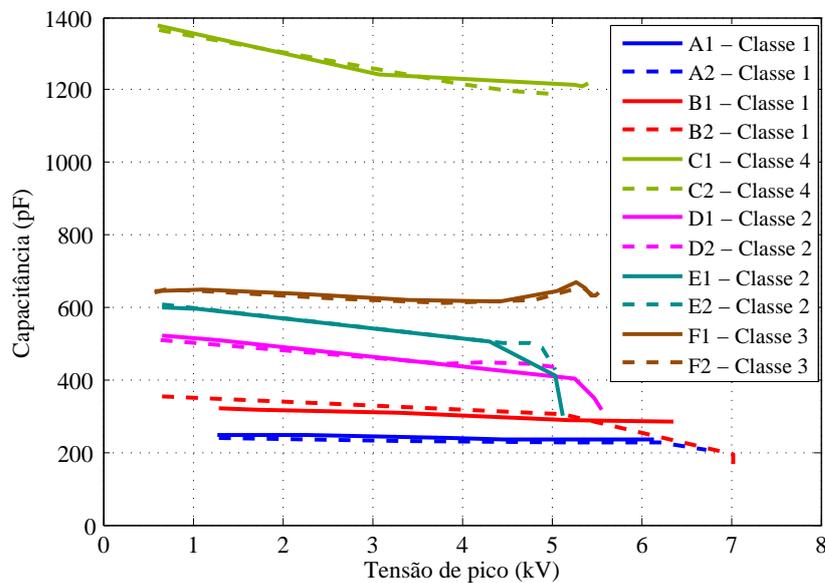
Na Figura 5.7 é possível constatar que os varistores de mesma classe de descarga em linha possuem capacitâncias com valores próximos. Decidiu-se então calcular a curva característica $C-V$ média de cada classe de descarga em linha. Entretanto, os varistores classe 2, tipo D e E, possuem diferentes valores de altura, 30 mm e 22,5 mm, respectivamente. Dessa forma, o cálculo da curva média, diretamente, não estaria correto, visto que a capacitância do varistor de ZnO é inversamente proporcional à altura e a tensão no varistor de ZnO é diretamente proporcional. Decidiu-se, então, determinar a curva $C-V$

dos varistores tipo E proporcional à altura dos varistores tipo D. Para isto, multiplicou-se a capacitância dos varistores tipo E por 0,75 (22,5 mm/30 mm) e a tensão por 1,33 (30 mm/22,5 mm). Na Figura 5.8 são mostradas as curvas características $C-V$ com os ajustes realizados para os varistores tipo E.

Após a realização do devido ajuste nas curvas $C-V$ dos varistores tipo E, foram determinadas as curvas médias de cada classe de descarga em linha. As curvas são mostradas na Figura 5.9.

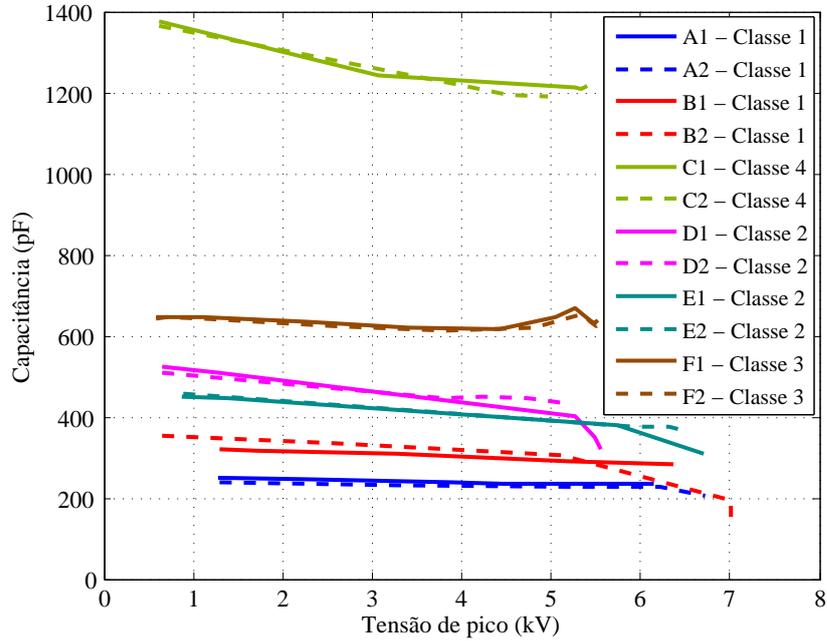
Na região de baixas correntes, o supressor de surto de ZnO opera com valores de tensão próximos (abaixo) do seu valor de MCOV (Máxima Tensão de Operação Contínua). Sendo assim, para simplificar o modelo elétrico do supressor de surto de ZnO, o valor da capacitância do modelo foi considerado fixo. O valor corresponde à capacitância do supressor de surto na tensão MCOV.

Figura 5.7 – Curvas características da capacitância em função da tensão na região de baixas correntes.



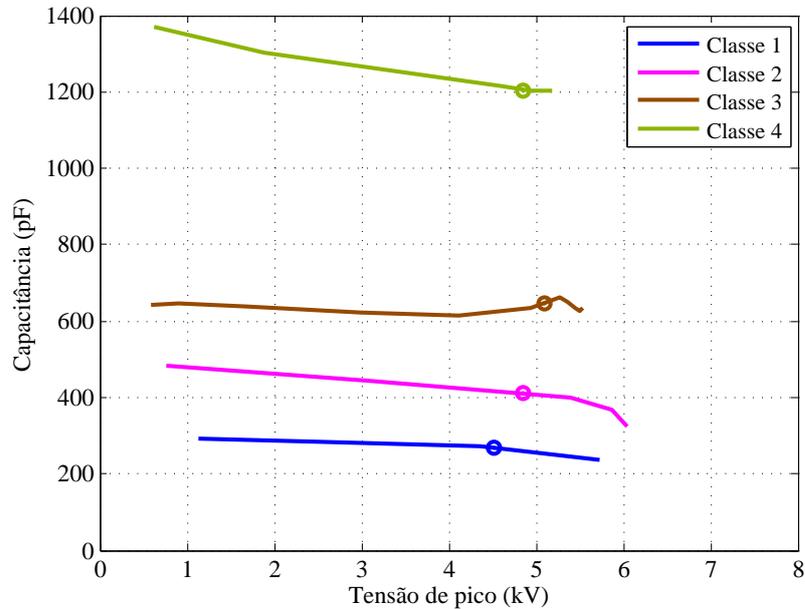
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.8 – Curvas características $C-V$ na região de baixas correntes com ajustes realizados nas curvas dos varistores tipo E.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.9 – Curvas características da capacitância média em função da tensão e classe de descarga em linha na região de baixas correntes.



Fonte: Produzida pelo autor.

O valor da tensão MCOV do varistor de ZnO é diretamente proporcional à sua altura. Os varistores tipo A (classe 1) possuem alturas de aproximadamente 28 mm e tensão MCOV de 3,2 kV_{RMS}. Decidiu-se então determinar os valores de tensão MCOV dos demais varistores de ZnO, agrupados por classe de descarga em linha, com base na altura e tensão MCOV dos varistores tipo A. Na Tabela 5.2 são apresentados os valores das tensões MCOV para os varistores de ZnO de acordo com a altura e classe de descarga em linha. Assim sendo, os valores de capacitância para cada classe de descarga em linha foram obtidos graficamente a partir da Figura 5.9, marcando os valores de capacitância que correspondem ao valor de pico da tensão MCOV. Os valores das capacitâncias estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.2 – Valores estimados das tensões MCOV dos varistores de ZnO ensaiados, agrupados por classe de descarga em linha.

Classe de Descarga em Linha	Altura (m)	Tensão MCOV (kV _{RMS})	Tensão MCOV (kV _{PICO})
Classe 1	0,028	3,2	4,52
Classe 2	0,030	3,43	4,85
Classe 3	0,0315	3,6	5,09
Classe 4	0,030	3,43	4,85

Fonte: Produzida pelo autor.

Considerando à associação de capacitores em série e paralelo, e os dados mostrados na Tabela 5.3, a capacitância do supressor de surto foi determinada como apresentado na Tabela 5.4, em que h é a altura do supressor de surto em metros e n é o número de colunas de varistores conectadas em paralelo no interior do supressor de surto.

As amostras de varistores ensaiados não contemplam a classe 5 de descarga em linha. Entretanto, a capacitância para essa classe pode ser estimada com base na altura do supressor de surto e corrente capacitiva típica. De acordo com a norma IEC 60099-5 (2000) a corrente capacitiva de um supressor de surto varia de 0,2 mA a 3 mA em condições normais de operação. A aplicação comum de um supressor de surto de classe 5 é em sistemas elétricos de 500 kV, onde há uma maior necessidade de absorção de energia. Para esse nível de tensão, um valor típico de tensão MCOV é 336 kV. Adotando o valor de corrente de 2,5 mA quando submetido à tensão MCOV, um pouco abaixo do limite

estimado na norma IEC 60099-5 (2000), a capacitância estimada é calculada utilizando as equações a seguir:

$$X_C = \frac{V_{MCOV}}{I_C} = \frac{336 \text{ kV}}{2,5 \text{ mA}} = 134,4 \text{ M}\Omega, \quad (5.1)$$

em que X_C é a reatância capacitiva.

$$C = \frac{1}{X_C \times 2\pi f} = \frac{1}{134,4 \times 10^6 \times 2\pi 60} = 19,74 \text{ pF}, \quad (5.2)$$

em que C é a capacitância do supressor de surto e f é a frequência industrial.

A altura típica de um supressor de surto utilizado em sistemas elétricos de 500 kV é 4 m. Dessa forma, a capacitância estimada de um supressor de surto classe 5 em função da altura h em metros e número de coluna de varistores n foi definida pela Equação 5.3, também apresentada na Tabela 5.4.

$$C = 19,74 \text{ pF} \times 4 \text{ m} \times \frac{n}{h \text{ (m)}} = 78,96 \text{ pF} \times n/h. \quad (5.3)$$

Tabela 5.3 – Valores estimados da capacitância dos varistores de acordo com a classe de descarga em linha e altura.

Classe de Descarga em Linha	Altura (m)	Capacitância (pF)
Classe 1	0,028	267
Classe 2	0,030	410
Classe 3	0,0315	645
Classe 4	0,030	1205

Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 5.4 – Capacitância do supressor de surto de ZnO de acordo com a classe de descarga em linha, altura h e número n de colunas de varistores no interior do supressor de surto.

Classe de Descarga em Linha	Capacitância (pF \times n/h)
Classe 1	7,48
Classe 2	12,30
Classe 3	20,32
Classe 4	36,15
Classe 5	78,96

n é o número de colunas no interior do supressor de surto e h é a altura do supressor de surto em metros.

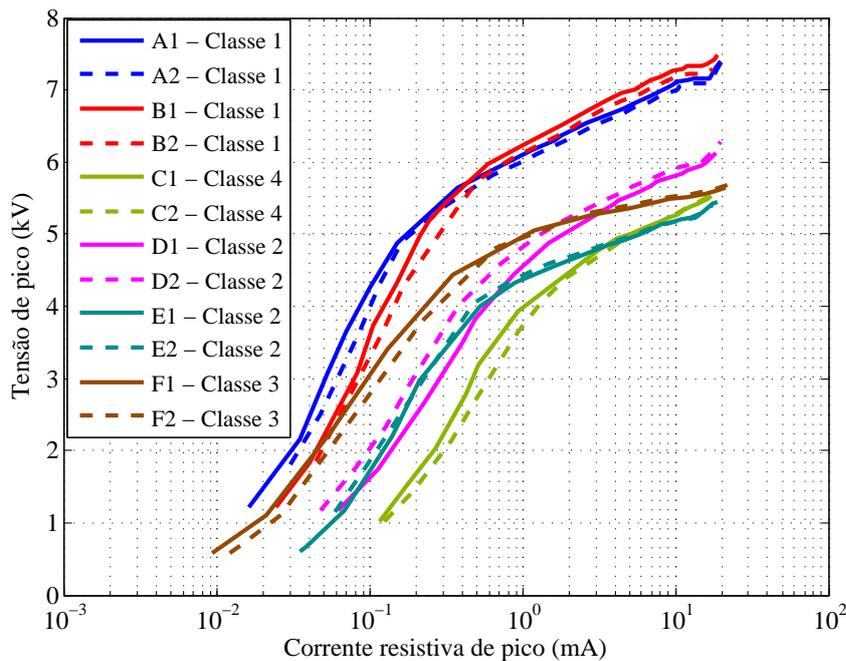
Fonte: Produzida pelo autor.

Portanto, o parâmetro C é determinado a partir das equações apresentadas na Tabela 5.4. Para obtenção de C é necessário conhecer a classe de descarga em linha, altura e número de colunas de varistores no interior do supressor de surto. Na sequência, serão apresentados os procedimentos empregados na determinação de $R(i)$.

O comportamento do parâmetro $R(i)$, na região de baixas correntes, também foi obtido a partir da aplicação do método da estimação da capacitância. Na Figura 5.10 observam-se as curvas características da tensão versus a componente resistiva da corrente de fuga, em que a componente resistiva é apresentada em escala logarítmica.

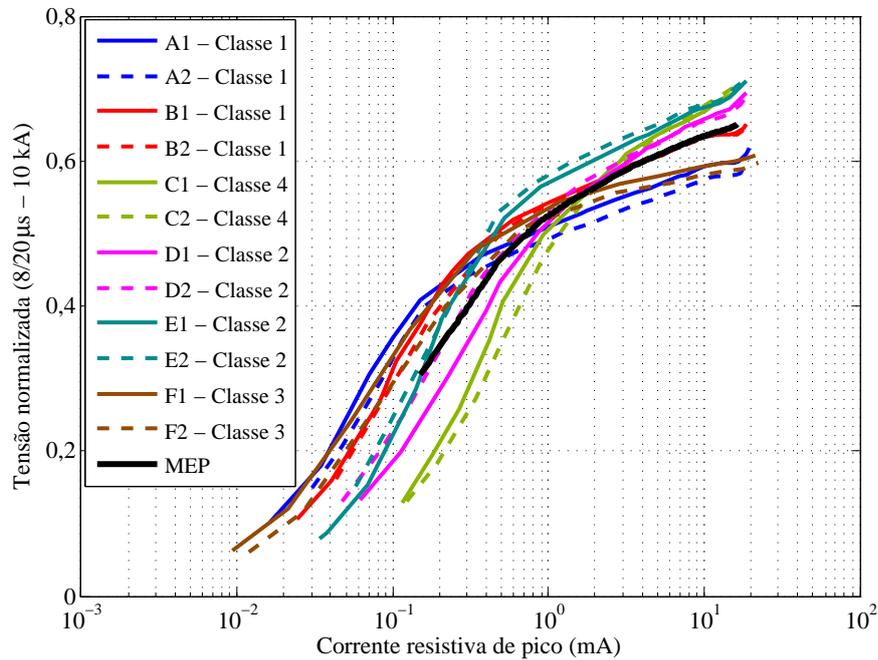
Na Figura 5.10 é possível observar que o comportamento das curvas características dos varistores são semelhantes, apesar das curvas características $V-I_r$ possuírem valores de tensão e corrente distintos. Sendo assim, decidiu-se normalizar as curvas $V-I_r$ pelo valor da tensão residual para o impulso de corrente $8/20 \mu s - 10 \text{ kA}$. As curvas normalizadas são apresentadas na Figura 5.11. A curva em preto apresentada na Figura 5.11, representa o comportamento médio normalizado da curva $V-I_r$ na região de baixas correntes. Os valores dos pontos em p.u. da curva $V-I_r$ da resistência não linear na região de baixas correntes estão mostrados na Tabela 5.5.

Figura 5.10 – Curvas características da tensão versus a componente resistiva da corrente de fuga na região de baixas correntes.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.11 – Curva característica normalizada da tensão versus a componente resistiva da corrente de fuga na região de baixas correntes.



Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 5.5 – Característica $V-I_r$ da resistência não linear do MEP para a região de baixas correntes.

Corrente (mA)	Tensão (p.u.)
0,15	0,30
0,60	0,48
2,00	0,56
5,00	0,61
10,00	0,63
16,00	0,65

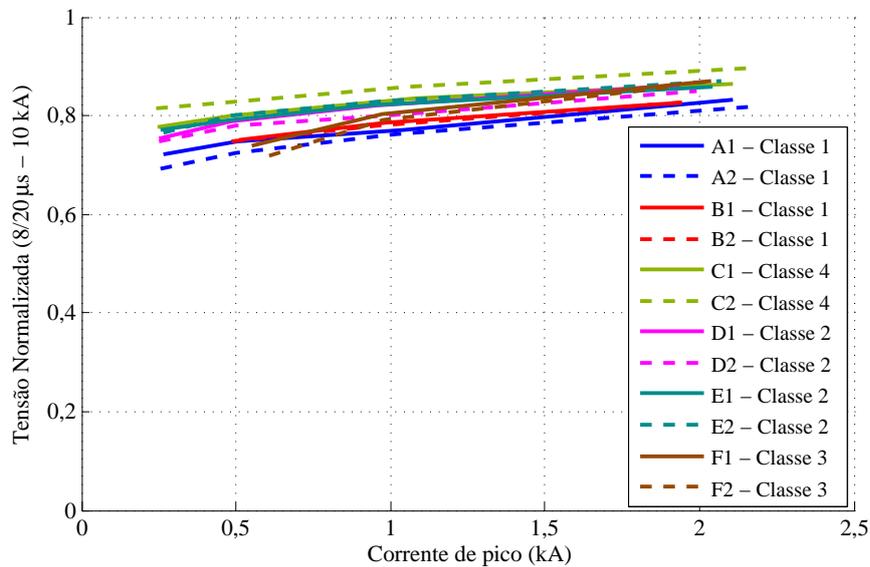
Fonte: Produzida pelo autor.

Uma vez caracterizada a região de baixas correntes, a próxima região a ser caracterizada é a de alta não linearidade. Assim, para a sua modelagem, doze varistores de ZnO foram submetidos a impulsos de corrente de manobra com forma de onda 30/60 μs e amplitudes de 250, 500, 1000 e 2000 A. Em seguida, os valores de pico das tensões residuais medidas para cada amplitude de corrente foram normalizados pela tensão residual para o impulso de corrente 8/20 μs - 10 kA, e interpolados linearmente, constituindo as curvas

características $V-I_r$ para a região de alta não linearidade.

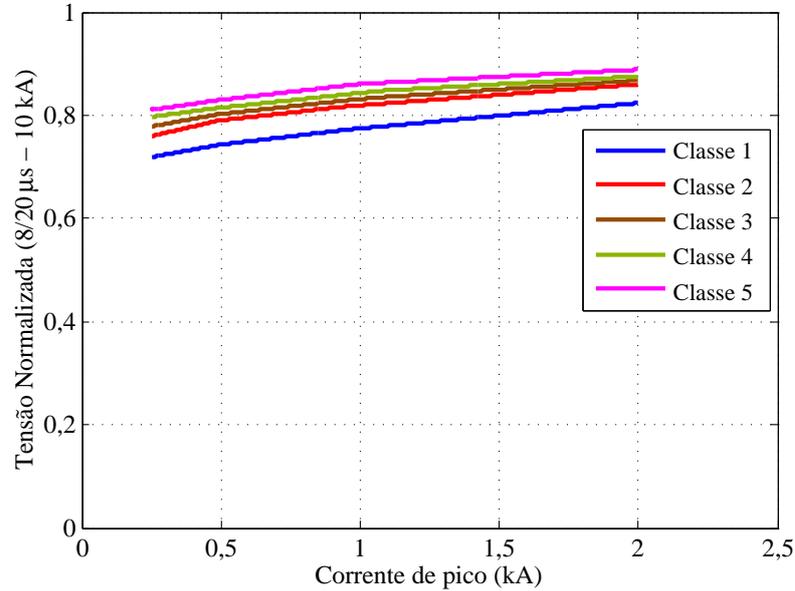
As curvas características $V-I_r$ para a região de alta não linearidade estão mostradas na Figura 5.12. Verificou-se que o comportamento da curva característica $V-I_r$ na região de alta não linearidade depende da classe de descarga em linha do supressor de surto. Sendo assim, a adoção de uma curva média resultaria em uma imprecisão no modelo. Decidiu-se então relacionar a curva característica $V-I_r$ com a classe de descarga em linha. Para isso, determinou-se o comportamento médio da curva $V-I_r$ das classes 1 a 4, calculando-se a média a partir das curvas $V-I_r$ mostradas na Figura 5.12, dos varistores com mesma classe. A curva característica $V-I_r$ de classe 5 foi obtida a partir da média das curvas $V-I$ de três supressores de surto de ZnO - classe 5, de fabricantes diferentes, obtidas em catálogos. Na Figura 5.13 são apresentadas as curvas características $V-I_r$ na região de alta não linearidade em função da classe de descarga em linha do supressor de surto. Na Tabela 5.6 são mostrados os valores dos pontos em p.u. para cada uma das cinco classes de descarga em linha.

Figura 5.12 – Curvas características normalizadas da tensão versus a componente resistiva da corrente de fuga na região de alta não linearidade.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.13 – Curvas características normalizadas da tensão versus a componente resistiva da corrente de fuga na região de alta não linearidade em função da classe de descarga em linha.



Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 5.6 – Característica $V-I_r$ normalizada da resistência não linear do MEP na região de alta não linearidade de acordo com a classe de descarga em linha do supressor de surto de ZnO.

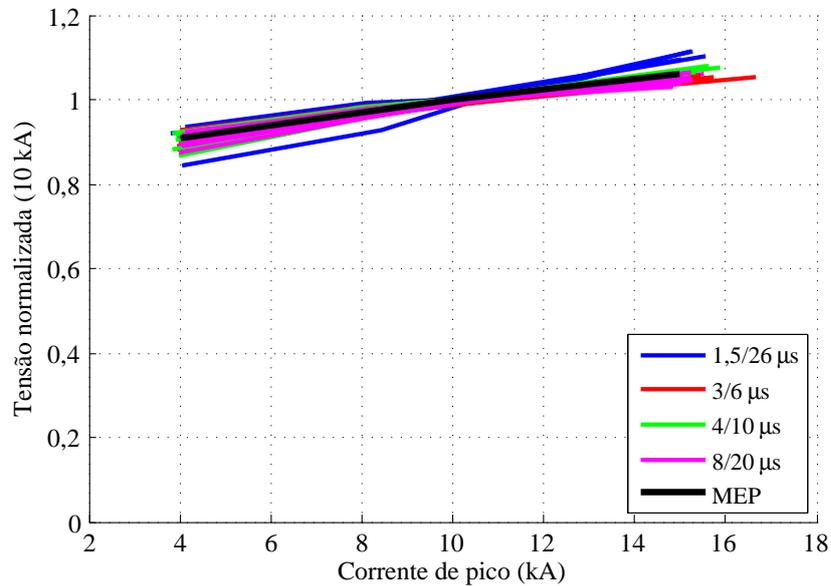
Corrente (A)	Tensão (p.u.)				
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
250	0,72	0,76	0,78	0,80	0,81
500	0,74	0,79	0,80	0,81	0,83
1000	0,77	0,82	0,83	0,84	0,86
2000	0,82	0,86	0,87	0,88	0,89

Fonte: Produzida pelo autor.

Da mesma forma, para modelar a região de altas correntes, doze varistores foram submetidos a impulsos de corrente com formas de onda $1,5/26 \mu s$, $3/6 \mu s$, $4/10 \mu s$ e $8/20 \mu s$, e amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA. Em seguida, os valores de pico das tensões residuais medidas para cada amplitude de corrente foram normalizados pelo valor de pico da tensão residual com amplitude de 10 kA, de cada uma das quatro formas de onda. As curvas características $V-I_r$ para a região de altas correntes estão mostradas na Figura 5.14. Na

curva em preto da Figura 5.14, é visualizado o comportamento médio da curva característica $V-I_r$ na região de altas correntes. Na curva em preto da Figura 5.15 é apresentado o comportamento médio da curva característica $V-I_r$ na região de altas correntes, com valores extrapolados na faixa de 15 kA a 40 kA. Os valores em p.u. nessa faixa de extração foram obtidos a partir do comportamento médio de curvas disponibilizadas por fabricantes em seus *datasheets*. Os valores dos pontos em p.u. da curva $V-I_r$ da resistência não linear na região de altas correntes estão mostrados na Tabela 5.7.

Figura 5.14 – Curva característica da componente resistiva da corrente de fuga versus tensão na região de altas correntes.



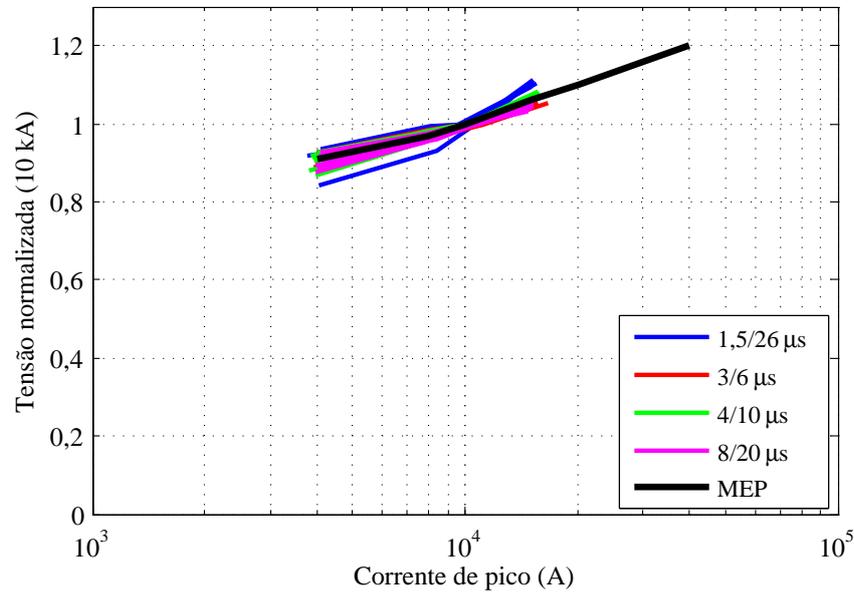
Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 5.7 – Característica $V-I_r$ da resistência não linear do MEP para região de altas correntes.

Corrente (kA)	Tensão (p.u.)
4	0,91
8	0,97
10	1
15	1,06
20	1,10
40	1,20

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.15 – Curvas características da componente resistiva da corrente de fuga versus tensão na região de altas correntes em escala semi-logarítmica, com comportamento extrapolado para amplitudes de 15 a 40 kA.



Fonte: Produzida pelo autor.

Enfim, o comportamento resistivo do parâmetro $R(i)$ foi determinado. Os valores dos pontos em p.u. da curva $V-I_r$ da resistência não linear, para as três regiões de operação do supressor de surto de ZnO, são apresentados na Tabela 5.8. Na Figura 5.16 é visualizada em uma escala semi-logarítmica, a curva característica $V-I_r$ da resistência não linear do MEP.

A região de alta não linearidade da curva característica $V-I_r$ foi determinada a partir de medições de impulsos de corrente de manobra. Entretanto, por limitações da capacidade de absorção de energia pelo supressor de surto, uma considerável faixa de corrente, 18 mA a 250 A, não foi caracterizada. No entanto, é sabido que nessa faixa a característica pode ser expressa pela Equação 5.4.

$$i = p \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q, \quad (5.4)$$

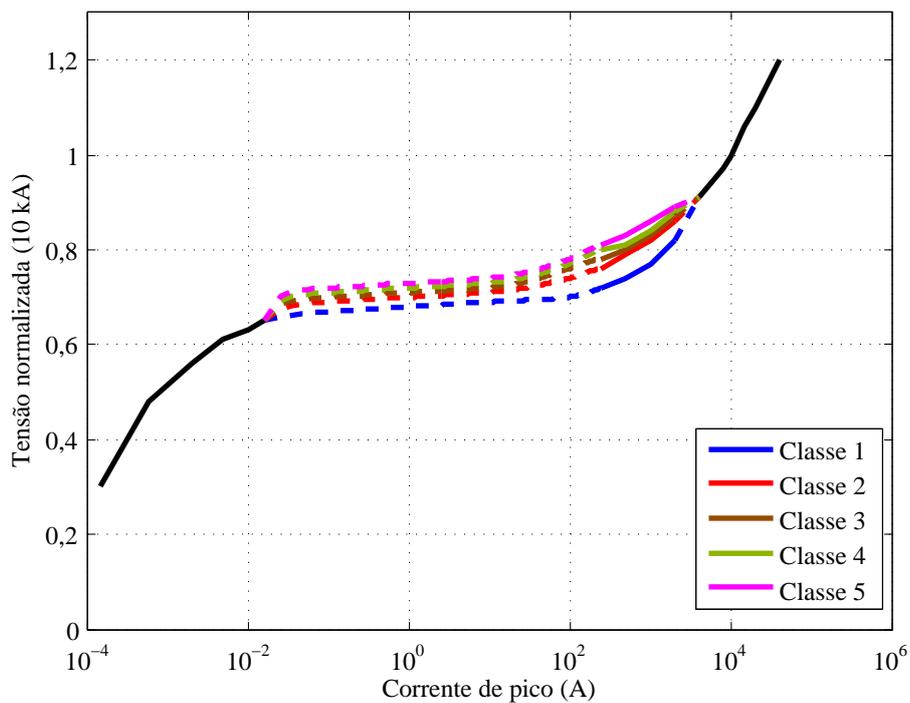
em que os parâmetros i e v são a corrente e a tensão no supressor de surto, respectivamente, q é o coeficiente de não linearidade, p um fator multiplicador e V_{ref} é uma tensão de referência arbitrária que normaliza a equação e previne problemas de representação numérica (*overflow*) durante a potenciação.

Tabela 5.8 – Característica $V-I_r$ da resistência não linear do MEP.

Corrente (A)	Tensão (p.u.)
0,00015	0,30
0,00060	0,48
0,00200	0,56
0,00500	0,61
0,01000	0,63
0,01600	0,65
250	0,72 - 0,81*
500	0,74 - 0,83*
1000	0,77 - 0,86*
2000	0,82 - 0,89*
4000	0,91
8000	0,97
10000	1
15000	1,06
20000	1,10
40000	1,20

* Na região altamente não linear, os valores em p.u. dependem da classe de descarga em linha conforme Tabela 5.6.

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.16 – Curva característica $V-I_r$ da resistência não linear do MEP.

Fonte: Produzida pelo autor.

5.5 Resumo para Determinação dos Parâmetros do MEP

A seguir é descrito o passo a passo para determinação dos parâmetros do MEP:

1 - Determinar os parâmetros L e R_L , como segue:

$$L = h \mu\text{H},$$

$$R_L = \frac{8 \times L}{\Delta t}, \quad (5.5)$$

em que h é a altura do supressor de surto em metros e Δt é o valor do passo de tempo utilizado na simulação.

2 - Determinar o parâmetro C de acordo com o número de colunas n de varistores em paralelo, no interior do supressor de surto, a altura h em metros e a classe de descarga em linha de transmissão do supressor de surto modelado, conforme apresentado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Capacitância do supressor de surto de ZnO de acordo com a classe de descarga em linha, altura h e número n de colunas de varistores no interior do supressor de surto.

Classe de Descarga em Linha	Capacitância (pF $\times n/h$)
Classe 1	7,48
Classe 2	12,30
Classe 3	20,32
Classe 4	36,15
Classe 5	78,96

n é o número de colunas no interior do supressor de surto e h é a altura do supressor de surto em metros.

Fonte: Produzida pelo autor.

3 - Determinar o parâmetro R_C utilizando a equação a seguir:

$$R_C = \frac{0,15 \times \Delta t}{2C}. \quad (5.6)$$

4 - Caso a simulação seja de descarga atmosférica ($8/20 \mu\text{s}$), impulsos de manobra ou região de baixas correntes, determinar no *datasheet* do fabricante do supressor de surto, o valor da tensão residual para o impulso de descarga atmosférica ($8/20 \mu\text{s}$) com amplitude de 10 kA. Em seguida, multiplicar esse valor pelos pontos em p.u. da curva característica $V-I_r$ mostrados na Tabela 5.8. Sugere-se ajustar os pontos em p.u. pela Equação 5.4.

Vale salientar que os pontos em p.u. na região de 250 a 2000 A dependem da classe de descarga em linha do supressor de surto. Esses valores são mostrados na Tabela 5.6.

5 - Caso a simulação seja de descargas de corrente com formas de onda específicas, exemplos, $4/10 \mu s$ e $1/2 \mu s$, multiplicar os seis últimos pontos em p.u. da curva característica $V-I_r$ pela tensão residual com amplitude de 10 kA para forma de onda utilizada. Os demais pontos são multiplicados pela tensão residual para o impulso de corrente $8/20 \mu s$ - 10 kA.

Capítulo 6

Análise do Desempenho do Modelo Elétrico Proposto

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises do desempenho do Modelo Elétrico Proposto (MEP), operando nas três regiões da curva característica $V-I$ do supressor de surto de ZnO. Na região de baixas correntes, os sinais de tensão medidos em laboratório são utilizados como dados de entrada para o MEP, e os sinais de corrente de fuga fornecidos pelo MEP são comparados com os sinais de corrente de fuga medidos. Para as regiões de alta não linearidade e altas correntes, os dados de entrada são os impulsos de corrente medidos, e os sinais das tensões residuais fornecidas pelo MEP são comparados com as tensões residuais medidas em laboratório. A compensação indutiva foi realizada.

Com o intuito de validar o modelo proposto, os resultados do MEP também são comparados com os resultados fornecidos pelos modelos Convencional e IEEE. O modelo Convencional só foi possível ser empregado nos varistores tipo A, por serem os únicos em que se conhecia a curva característica $V-I$ fornecida no *datasheet* do fabricante. Os parâmetros de comparação para região de baixas correntes são o erro de pico e o índice de determinação ou estatística R^2 , sendo o último relacionado com a forma de onda do sinal de corrente. Para as regiões de alta não linearidade e altas correntes é adicionado como parâmetro de comparação o erro de energia, e a estatística R^2 é calculada para forma de onda da tensão residual.

6.1 Introdução

As simulações com o MEP, modelo Convencional e modelo IEEE foram realizadas no *software* ATP. Para tanto, foi necessário realizar uma filtragem dos sinais de tensão e corrente medidos. Para isso foi utilizado o filtro média móvel. Nas simulações realizadas na região de baixas correntes foi utilizado o valor de $4 \mu s$ para o passo de tempo. Já nas simulações realizadas nas regiões de alta não linearidade e altas correntes foi utilizado o valor de $1,5 ns$.

Os valores escolhidos para o passo de tempo satisfazem o critério de Nyquist da amostragem, em que para reconstruir o sinal original é necessário que a frequência de amostragem seja, no mínimo, igual ao dobro da frequência máxima contida no sinal analisado. Além disso, no caso dos impulsos de corrente, para reproduzir com maior fidelidade (nas simulações) os sinais medidos, adotou-se um passo de cálculo mil vezes menor ($1,5 ns$) que o tempo de frente do impulso de corrente mais rápido ($1,5 \mu s$).

Para comparação dos sinais simulados e medidos, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Na região de baixas correntes - valor de pico da corrente e estatística R^2 em relação à corrente medida.
- Na região altamente não linear - valor de pico da tensão residual, estatística R^2 em relação à tensão residual medida e valor de energia absorvida.
- Na região de altas correntes - valor de pico da tensão residual, estatística R^2 em relação à tensão residual medida e valor de energia absorvida.

Não foi avaliado o erro de energia na região de baixas correntes por não ser um parâmetro crítico, nessa região, para um supressor de surto em bom estado de conservação.

Para comparação do valor de pico, foram registrados os valores máximos das correntes (região de baixas correntes) e tensões (região altamente não linear e altas correntes) obtidas nas simulações (PS_j) e nos ensaios em laboratório (PE_j), e então calculado o erro percentual em relação ao valor de pico (EPP_j), e em seguida o erro percentual

absoluto médio ($EPMP$), conforme as Equações 6.1 e 6.2, respectivamente. Nas regiões de alta não linearidade e altas correntes foram aplicados dois impulsos de corrente ($n=2$) com mesmo valor de amplitude.

$$EPP_j = \frac{PS_j - PE_j}{PE_j} \cdot 100\%. \quad (6.1)$$

$$EPMP = \sum_{j=1}^n \frac{|EPP_j|}{n}. \quad (6.2)$$

Para a comparação dos valores de energia, foram calculados os valores de energia com base nas formas de onda da corrente e tensão, obtidas nos ensaios (EE_j) e nas simulações (ES_j), utilizando para isso a Equação 6.3. Em seguida foram calculados o erro percentual em relação ao valor de energia (EPE_j) e o erro percentual absoluto médio ($EPME$), conforme Equações 6.4 e 6.5, respectivamente.

$$E = \int_0^t V(t) \cdot I(t) dt, \quad (6.3)$$

em que $V(t)$ e $I(t)$ são a tensão residual e a corrente, respectivamente. Ambos os parâmetros estão em função do tempo t .

$$EPE_j = \frac{ES_j - EE_j}{EE_j} \cdot 100\%. \quad (6.4)$$

$$EPME = \sum_{j=1}^n \frac{|EPE_j|}{n}. \quad (6.5)$$

Para a comparação das formas de onda dos sinais de tensão e corrente medidos com os sinais fornecidos pelos modelos, foi utilizado o índice de determinação ou estatística R^2 . Ele é uma medida da capacidade que um modelo ajustado por um parâmetro, ou um conjunto de parâmetro, possui em representar um determinado conjunto de dados. Ele é definido como sendo “um” menos a razão entre a soma quadrática dos erros entre sinais medidos e calculados (SSE) e a soma dos erros quadráticos com relação à média dos dados medidos (SST), de acordo com a equação a seguir (TERRELL, 1999; THE MATHWORKS, INC., 2012):

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (6.6)$$

sendo:

$$SSE = \sum_{j=1}^m [v_m(j) - v_s(j)]^2, \quad (6.7)$$

e,

$$SST = \sum_{j=1}^m [v_m(j) - \bar{v}_m(j)]^2, \quad (6.8)$$

em que, v_m e v_s são respectivamente os valores medidos e fornecidos pelo MEP; m é o número de amostras; \bar{v}_m é o valor médio do sinal medido. O índice de determinação R^2 varia de zero a “um”, e quanto mais próximo de “um” for R^2 mais correlacionados estão os sinais medidos e fornecidos pelos modelos avaliados.

6.2 Validação do MEP na Região de Baixas Correntes

Os sinais de tensão medidos na região de baixas correntes foram utilizados como dados de entrada para o MEP, e as respectivas correntes de fuga medidas foram comparadas com os resultados de corrente fornecidos pelo MEP.

O modelo da resistência não linear (Convencional) é o mais comumente utilizado pelas concessionárias de energia elétrica, portanto ele foi empregado para a comparação com os sinais medidos. Na sua aplicação os pontos da curva característica $V-I$ fornecida pelo fabricante foram utilizados. Contudo, o modelo Convencional somente foi aplicado apenas para o varistor tipo A, pois apenas para o varistor tipo A era conhecido os pontos $V-I$ fornecidos pelo fabricante.

Nas análises dos sinais das tensões medidas, constatou-se que os valores de distorção harmônica total (DHT) variaram entre 1 e 4% e também, constatou-se uma elevação dos erros do MEP à medida que a taxa de distorção harmônica total da tensão (DHT) aumentava. A Equação 6.9 foi utilizada no cálculo da DHT.

$$DHT = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{hmax} M_h^2}{M_1}}, \quad (6.9)$$

em que M_h é o valor rms da componente harmônica h . No cálculo da DHT foram utilizadas as componentes ímpares até a nona harmônica, devido às demais componentes ímpares apresentarem valores desprezíveis.

Para a caracterização da região de baixas correntes, os varistores foram submetidos a níveis crescentes de tensão. E a cada nível de tensão aplicado, as formas de onda da tensão e corrente de fuga foram adquiridas e armazenadas.

Para análise dos resultados, foram escolhidos quatro níveis de tensão e as respectivas formas de onda da tensão e corrente. Em seguida, os oito sinais de tensão e corrente foram filtrados e utilizados como dados de entrada para o MEP e modelo Convencional (apenas para o varistor tipo A). Na análise, os respectivos sinais de correntes foram comparados com os sinais de corrente fornecidos pelo MEP e modelo Convencional.

O modelo IEEE não foi abordado no estudo comparativo porque ele não é empregado na região de baixas correntes.

6.2.1 Análises das Formas de Onda da Corrente de Fuga

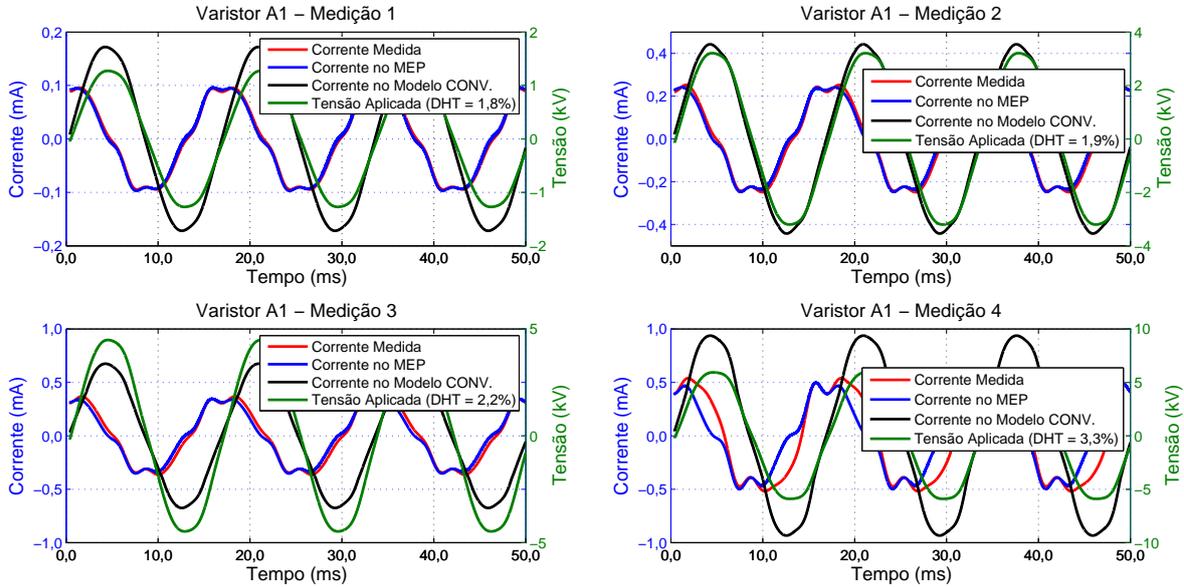
A seguir são apresentados os resultados obtidos para o MEP e modelo Convencional, operando na região de baixas correntes. As Figuras 6.1 a 6.5 apresentam as formas de onda da tensão e corrente medidas em ensaio, bem como a corrente fornecida pelo MEP e pelo modelo Convencional quando submetidos à tensão medida. A análise é feita para cada tipo de varistor, em quatro pontos de operação correspondentes a quatro medições de tensão e corrente. As Figuras 6.1 a 6.5 apresentam também o valor da DHT da tensão medida.

Na Figura 6.1, para o varistor tipo A, são apresentados os resultados de medição e simulação do MEP e modelo Convencional. O MEP apresentou uma forma de onda de corrente similar à corrente medida nas quatro medições apresentadas. Além disso, os resultados do MEP foram notoriamente superiores aos fornecidos pelo modelo Convencional, o qual apresentou comportamento senoidal e em fase com a tensão.

Os resultados de simulação do MEP, no quarto ponto de medição, apresentaram as maiores divergências nas suas formas de onda em relação às formas de onda medidas. Isso pode ser atribuído à DHT da tensão, uma vez que, para DHT acima de 3%, a literatura

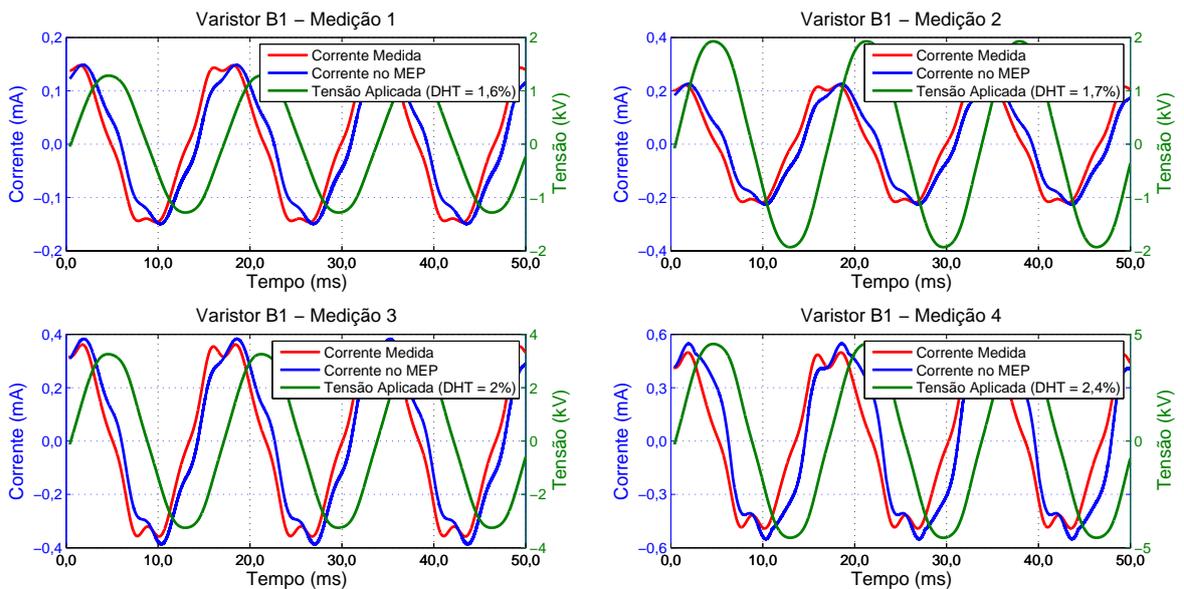
reporta significativa elevação da componente resistiva da corrente de fuga medida no varistor.

Figura 6.1 – Varistor tipo A: resultados das simulações do modelo Convencional e MEP, para quatro medições na região de baixas correntes.



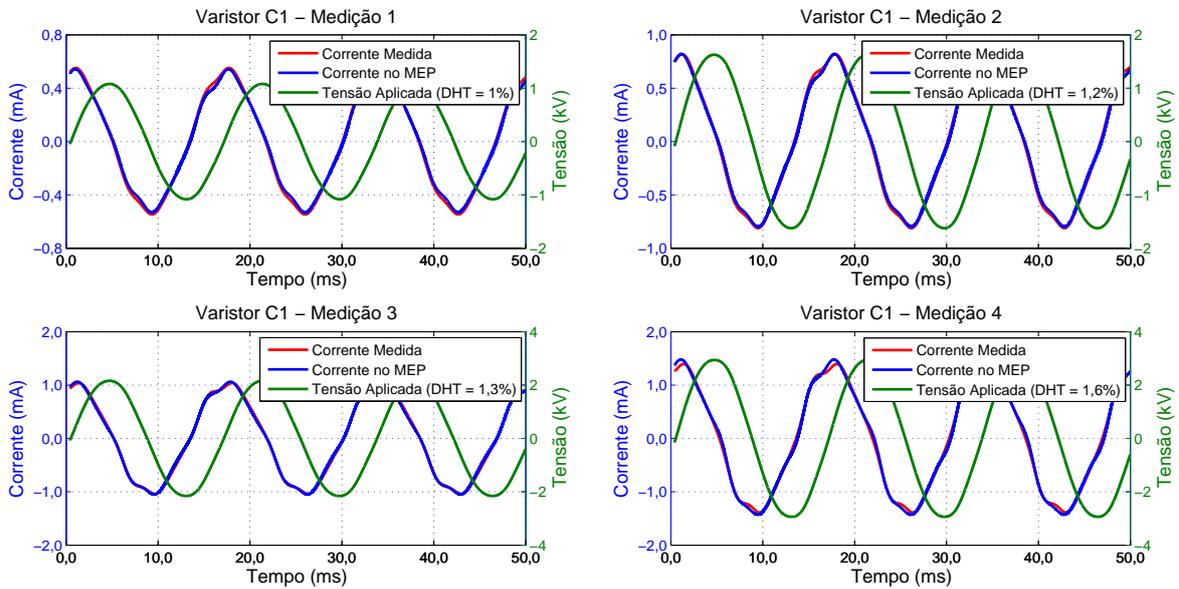
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.2 – Varistor tipo B: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.



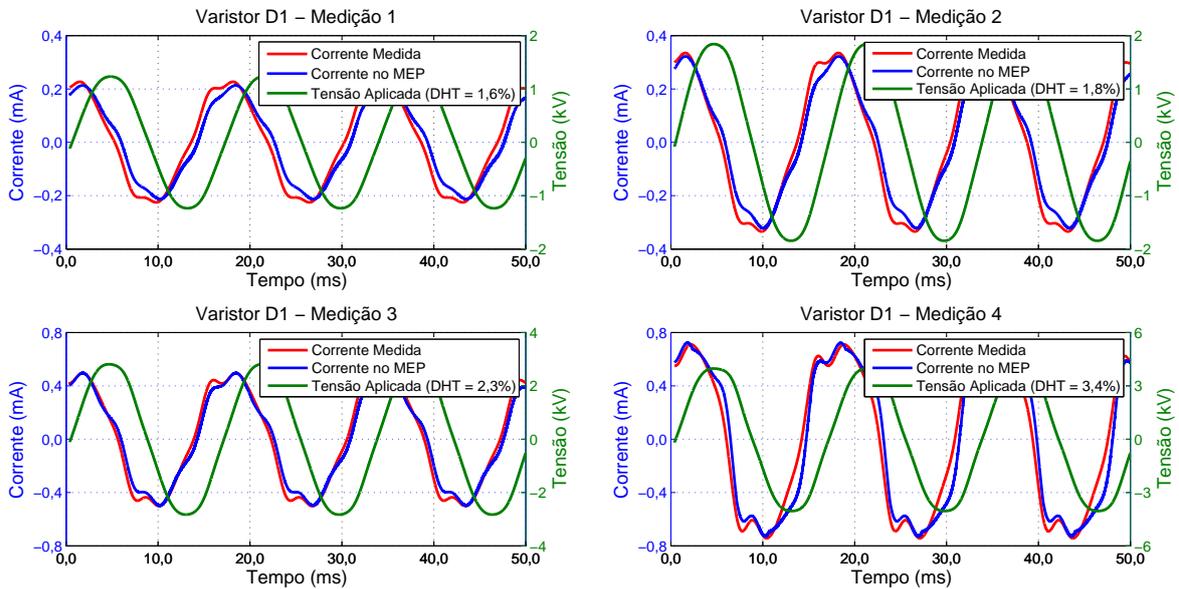
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.3 – Varistor tipo C: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.



Fonte: Produzida pelo autor.

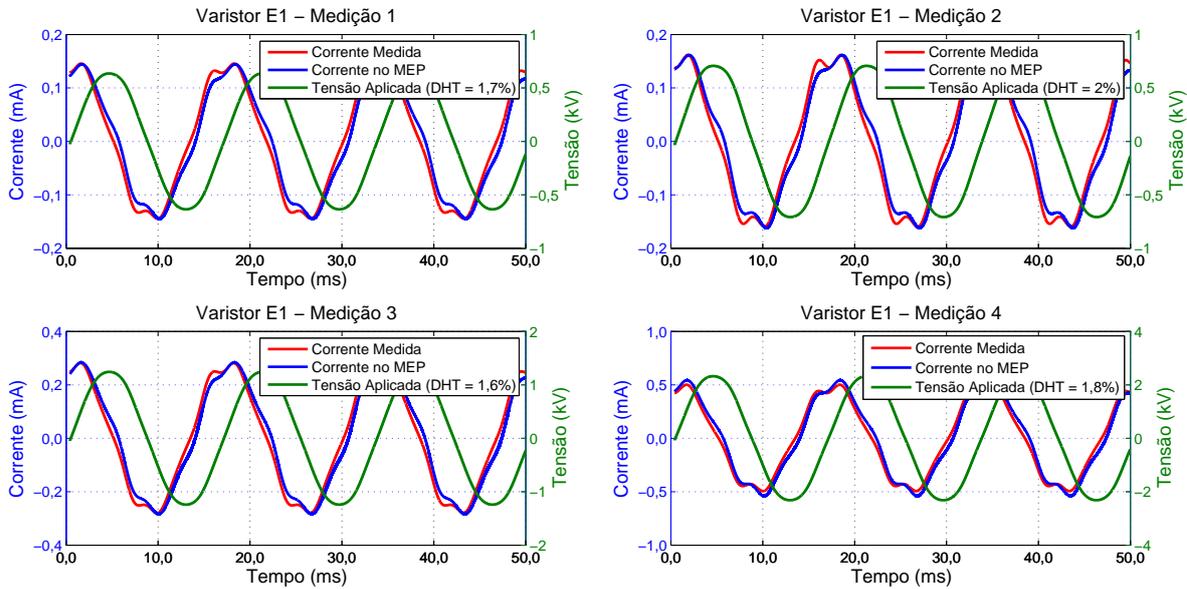
Figura 6.4 – Varistor tipo D: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.



Fonte: Produzida pelo autor.

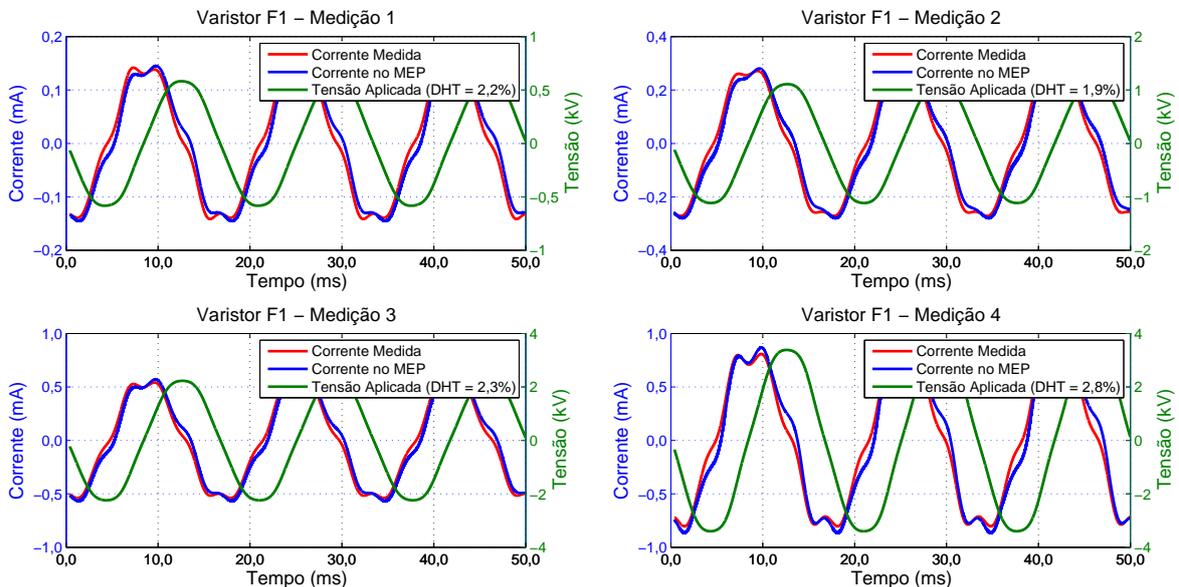
A modelagem do MEP para os varistores tipo B, C, D, E e F também apresentaram resultados satisfatórios. As formas de onda das correntes simuladas foram consideravelmente similares às correntes medidas, corroborando para a validação do MEP quanto à operação na região de baixas correntes.

Figura 6.5 – Varistor tipo E: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.6 – Varistor tipo F: resultado da simulação do MEP para quatro medições na região de baixas correntes.



Fonte: Produzida pelo autor.

Pelo exposto, constatou-se que as características elétricas do supressor de surto de ZnO na região de baixas correntes foram satisfatoriamente modeladas pelo MEP. O MEP representou a predominância da capacitância do supressor de surto de ZnO na região

de baixas correntes, apresentando uma defasagem entre tensão e corrente de quase 90° e amplitudes de corrente muito próximas dos sinais medidos. O MEP também representou satisfatoriamente o comportamento não linear das componentes resistivas da corrente de fuga dos varistores de ZnO avaliados. Em contrapartida, essas características não foram representadas pelo modelo Convencional, comumente utilizado na simulação de supressor de surto de ZnO em estudos sistêmicos.

6.2.2 Análises de Erros no Valor de Pico da Corrente de Fuga

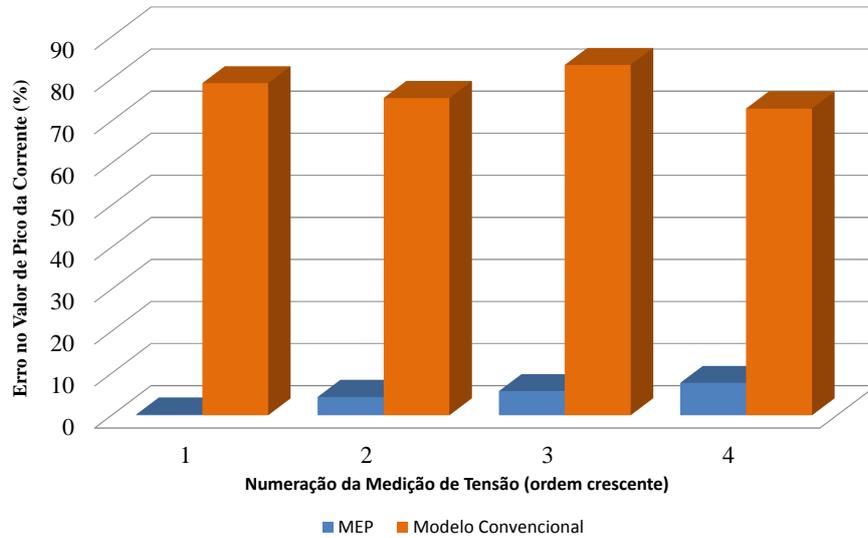
No gráfico da Figura 6.7 são apresentados os erros nos valores de pico das correntes de fuga fornecidas pelo MEP e modelo Convencional em comparação aos valores de medição. Na figura, verificam-se elevados erros no modelo Convencional frente aos pequenos erros do MEP. As medições sinalizadas de 1 a 4 estão relacionadas em ordem crescente com o nível de tensão aplicado. O varistor tipo A apresentou erros de pico menores que 8%. Em contrapartida, o modelo Convencional apresentou erros maiores que 70% para os quatro níveis de tensão aplicado, atingindo um valor máximo de erro de 83% no terceiro nível.

No gráfico da Figura 6.8 são apresentados os valores de erro de pico da corrente de fuga para todos os seis tipos de varistores. Assim como no gráfico da Figura 6.7, cada medição é sinalizada de 1 a 4. O varistor tipo B apresentou erros de pico menores que 10% e uma tendência de aumento do erro quando a tensão aumenta. Os varistores tipo C e D apresentaram erros abaixo de 7%. Os varistores tipo E e F apresentaram erros abaixo de 9%.

Embora aparentemente os erros percentuais possam ser considerados grandes, os erros absolutos são pequenos, visto que as correntes na região de baixas correntes possuem baixos valores de amplitude (na ordem de décimos de miliampères).

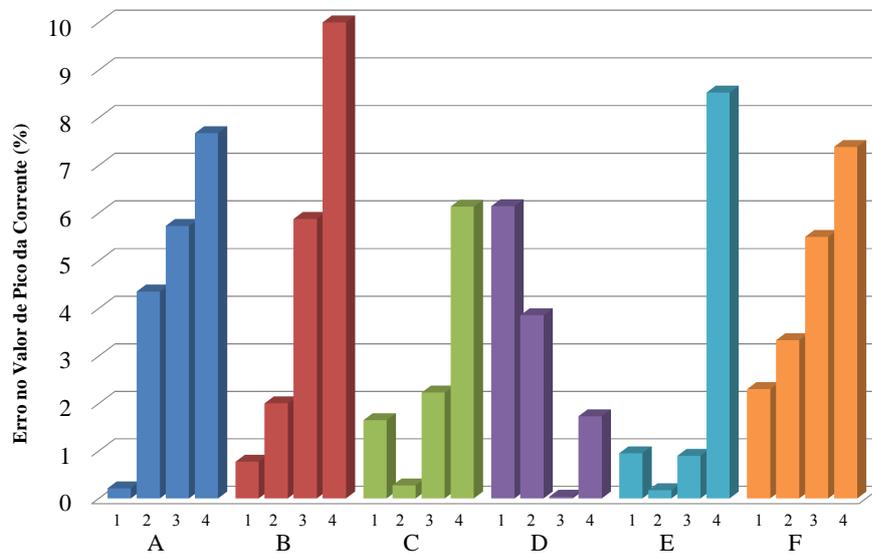
Deve-se salientar que pelo fato de as correntes na região de baixas correntes possuírem baixos valores de amplitude (na ordem de décimos de miliampères), estão suscetíveis a variações com a temperatura, umidade ou outros fatores externos. Assim, os erros obtidos estão dentro de uma faixa admissível.

Figura 6.7 – Varistor tipo A: comparação do erro no valor de pico da corrente, na região de baixas correntes, fornecido pelo MEP e modelo Convencional.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.8 – Erro no valor de pico da corrente para cada conjunto de quatro medições, na região de baixas corrente, em cada varistor.

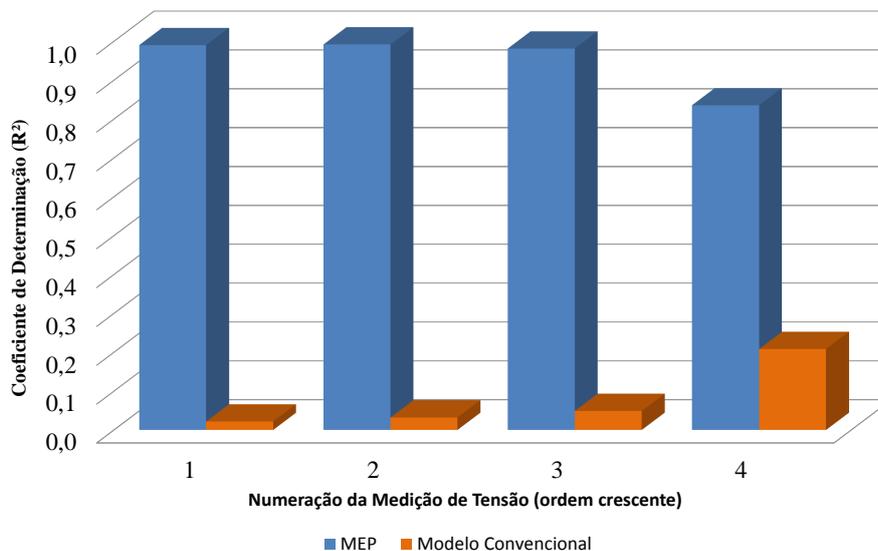


Fonte: Produzida pelo autor.

6.2.3 Análises da Estatística R^2 para a Corrente de Fuga

No gráfico da Figura 6.9 são apresentados os valores do coeficiente de determinação (R^2) fornecidos pelo MEP e modelo Convencional para o varistor tipo A, calculados conforme a Equação 6.6. O MEP apresentou valores de R^2 próximos à unidade, enquanto que o modelo Convencional não apresentou valores acima de 0,21.

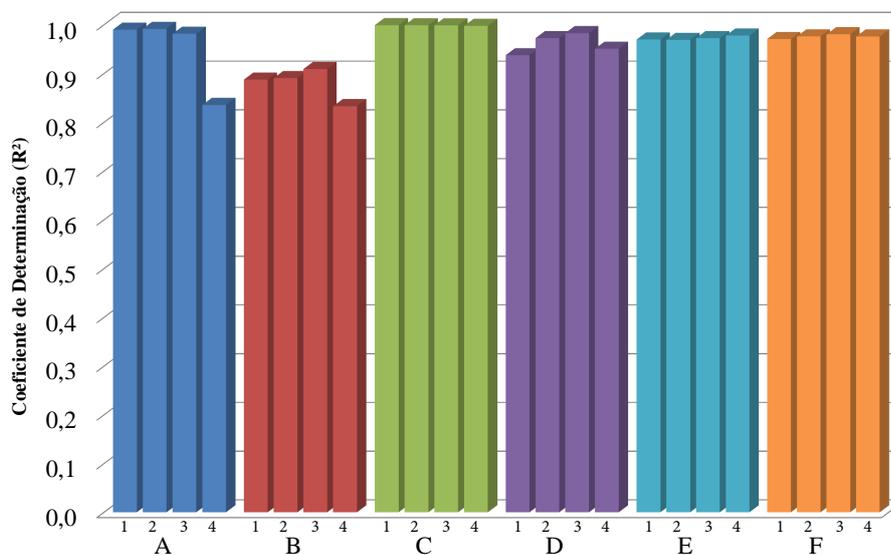
Figura 6.9 – Varistor tipo A: comparação do R^2 da forma de onda da corrente, na região de baixas correntes, fornecido pelo MEP e pelo modelo Convencional.



Fonte: Produzida pelo autor.

Os valores de estatística R^2 , apresentados na Figura 6.10, evidenciam que as formas de onda fornecidas pelo MEP possuem um elevado grau de similaridade com a corrente medida. Pode-se observar que o MEP modelou todos os varistores, em níveis de tensões diferentes, com um elevado grau de representatividade. Os valores de R^2 obtidos estão, todos, acima de 0,8. Os bons resultados sugerem a utilização do MEP na representação do comportamento do supressor de surto de ZnO na região de baixas correntes.

Figura 6.10 – Valores de R^2 para cada conjunto de quatro medições, na região de baixas correntes, em cada varistor.



Fonte: Produzida pelo autor.

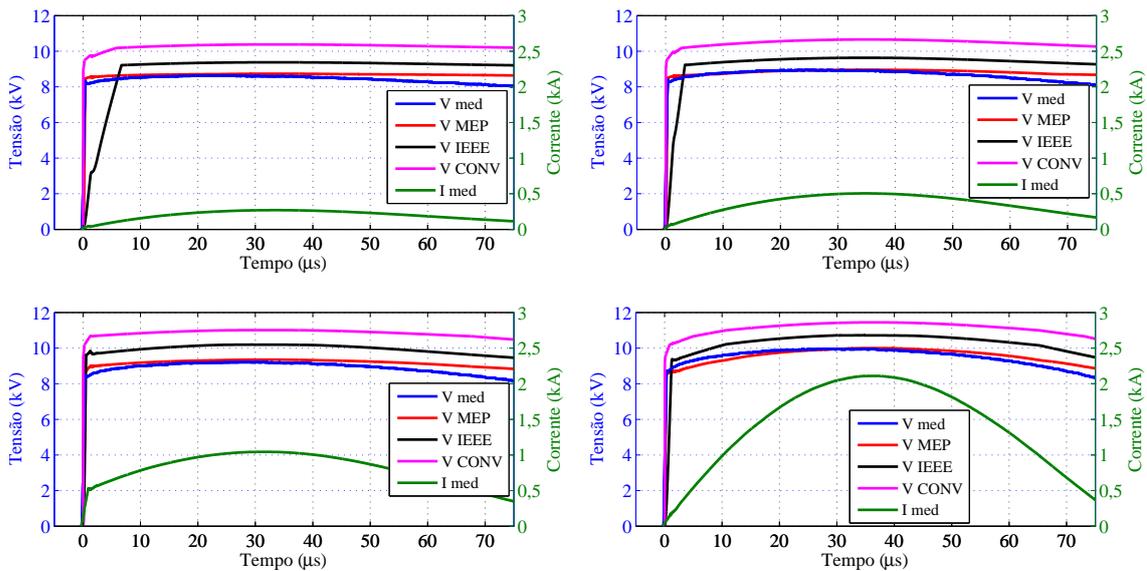
6.3 Validação do MEP na Região Altamente Não Linear

Os resultados de simulação do MEP, modelo IEEE e modelo Convencional operando na região altamente não linear serão analisados. Inicialmente, serão analisadas as formas de onda da tensão residual dos modelos, obtidas em resposta à aplicação de impulsos de corrente de manobra com forma de onda 30/60 μs e amplitudes de 250, 500, 1000 e 2000 A. Em seguida, serão analisados os erros nos valores de pico da tensão residual e energia absorvida. Por conseguinte, serão analisados os valores do coeficiente de determinação (R^2) em relação à forma de onda da tensão residual.

6.3.1 Análises das Formas de Onda da Tensão Residual

Na Figura 6.11 são apresentadas as formas de onda dos impulsos de corrente medidos (I_{med}) no varistor A1, as respectivas tensões residuais medidas e compensadas (V_{med}), fornecidas na simulação do MEP (V_{MEP}), dos modelos Convencional (V_{CONV}) e IEEE (V_{IEEE}). Foram utilizadas as quatro amplitudes de impulsos de corrente aplicados na região altamente não linear (250, 500, 1000 e 2000 A).

Figura 6.11 – Formas de onda do impulso de corrente 30/60 μs aplicado ao varistor A1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 250, 500, 1000 e 2000 A.



Fonte: Produzida pelo autor.

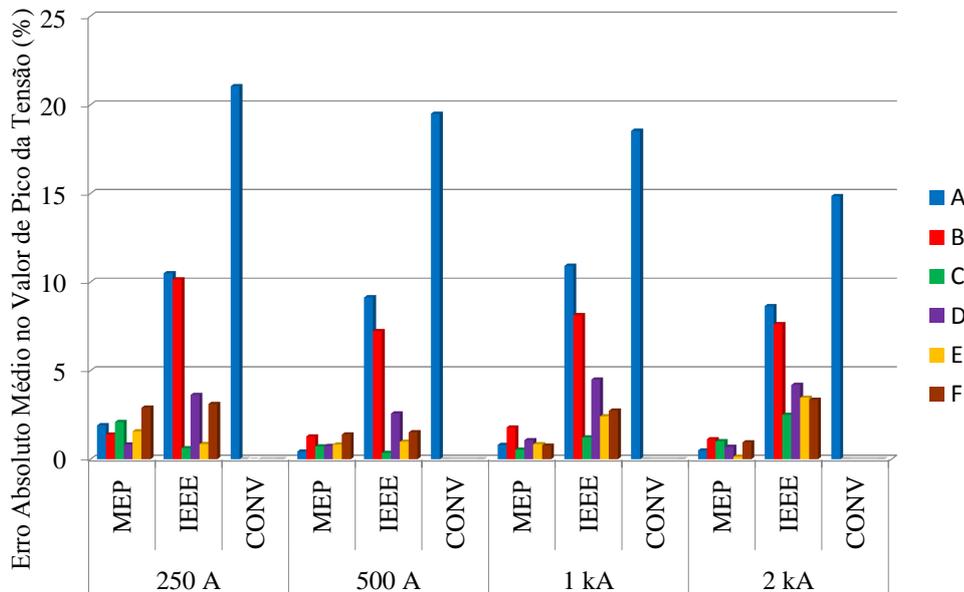
O comportamento das formas de onda das tensões residuais para os demais varistores foi semelhante, com a amplitude da tensão do modelo Convencional sempre superior aos sinais medidos. Nota-se na Figura 6.11 que existe um atraso da tensão no modelo IEEE para as amplitudes menores, de 250 A e 500 A. Isso ocorre devido a erros de representação do modelo IEEE nas regiões de baixas correntes e alta não linearidade.

6.3.2 Análises de Erros no Valor de Pico da Tensão Residual

Os resultados obtidos para os erros nos valores de pico da tensão residual dos seis tipos de varistores operando na região altamente não linear são apresentados na Figura 6.12, calculados conforme a Equação 6.2. Como para cada tipo de varistor foram ensaiados duas unidades, os valores de erro apresentados referem-se ao erro médio.

A partir dos gráficos apresentados, verifica-se que os erros variam de acordo com o tipo de varistor ensaiado e com as amplitudes dos impulsos aplicados. O modelo Convencional foi avaliado apenas para o varistor tipo A devido à ausência de informações referentes à curva característica $V-I$ para os demais varistores.

Figura 6.12 – Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 30/60 μs .



Fonte: Produzida pelo autor.

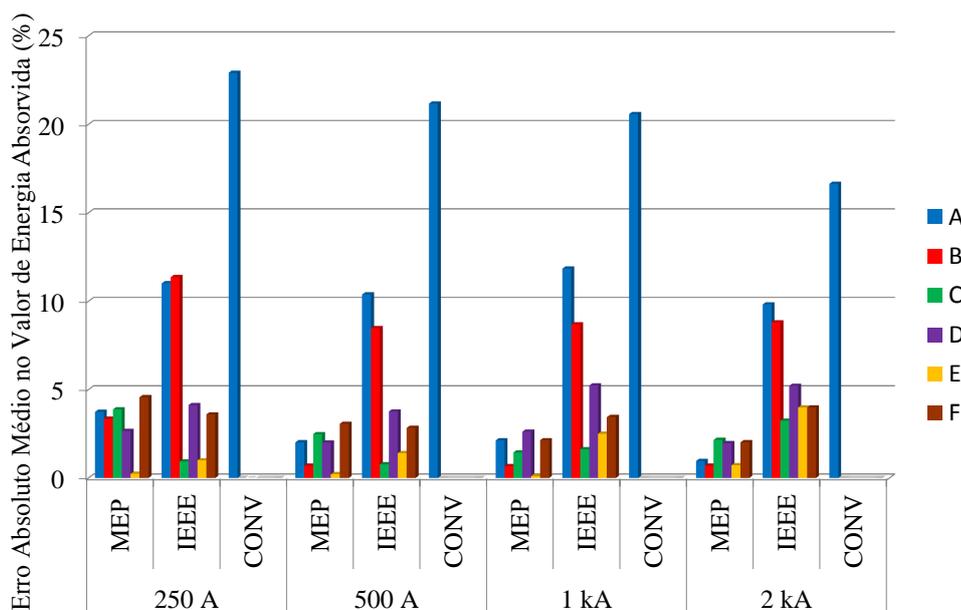
O MEP apresentou bom desempenho frente aos demais modelos em relação aos erros dos valores de pico da tensão residual na região altamente não linear, caracterizada pela

aplicação de impulsos de corrente de manobra. O MEP apresentou erro máximo de 2,9%, obtido para o varistor tipo F quando submetido à amplitude de 250 A, conforme mostrado na Figura 6.12. Já o modelo IEEE obteve um erro máximo de 10,9% quando submetido à amplitude de 1 kA, e o modelo Convencional apresentou erro máximo de 21% para amplitude de 250 A, ambos para o varistor tipo A. Logo, verifica-se que o MEP apresentou erros máximos inferiores aos modelos Convencional e IEEE.

6.3.3 Análises de Erros no Valor de Energia Absorvida

Os resultados obtidos para os erros nos valores de energia absorvida na região altamente não linear são apresentados na Figura 6.13, calculados conforme a Equação 6.5.

Figura 6.13 – Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente 30/60 μ s.



Fonte: Produzida pelo autor.

A partir dos gráficos apresentados, nota-se que em praticamente todos os seis tipos de varistores e amplitudes de corrente avaliados, o MEP obteve erros menores nos valores de energia quando comparados aos resultados dos modelos IEEE e Convencional. O maior valor de erro em módulo do MEP foi de 4,6% para amplitude de 250 A no varistor tipo F. Já para o modelo IEEE foi de 11,8% para amplitude de 1 kA, e 22,9% para o modelo Convencional, para amplitude de 250 A, ambos no varistor tipo A.

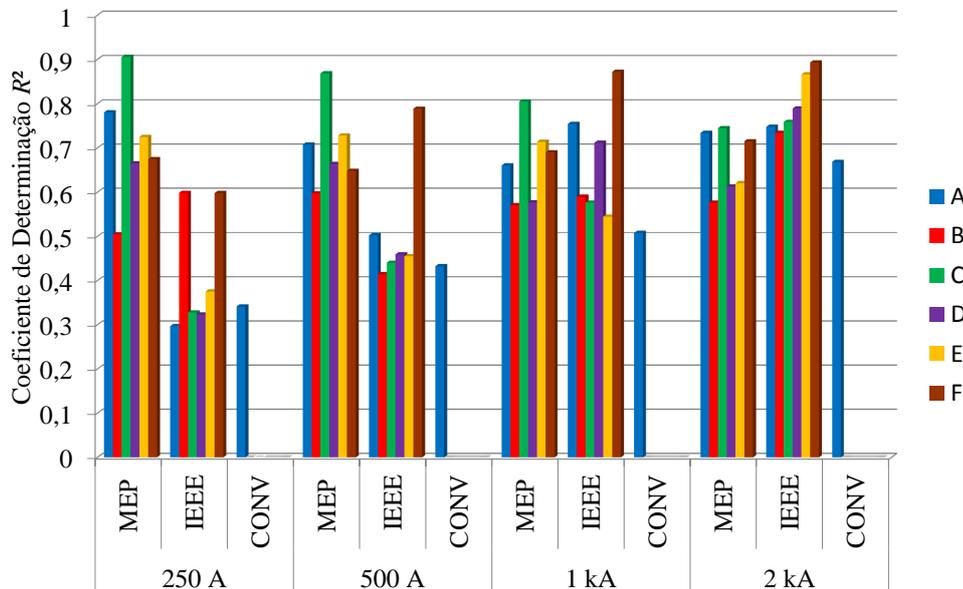
Para o modelo Convencional os erros foram elevados, maiores que 16% em todos os casos, atingindo valores de até 22,9% para o varistor tipo A. Os elevados valores de erros podem estar relacionados com erros de medição da tensão residual e consequentemente na construção da curva $V-I$ do supressor de surto de ZnO. O modelo IEEE apresentou erros de energia entre 8,4 e 11,8% para os varistores tipo A e B, mas para os demais varistores um baixo valor de erro, não superior a 5%.

6.3.4 Análises da Estatística R^2 para a Tensão Residual

Os resultados obtidos da análise da estatística R^2 na região altamente não linear são apresentados na Figura 6.14, calculados conforme a Equação 6.6.

Os valores de R^2 apresentados na Figura 6.14 mostram de forma geral um melhor desempenho do MEP em relação aos modelos Convencional e IEEE. Para as amplitudes de 250 A e 500 A, os valores de R^2 dos modelos IEEE e Convencional foram muito baixos, abaixo de 0,5 para a maioria dos varistores, enquanto que para o MEP os valores foram sempre superiores a 0,5.

Figura 6.14 – Estatística R^2 para o impulso de corrente 30/60 μs .



Fonte: Produzida pelo autor.

Durante a construção do MEP observou-se que ao aumentar o valor da indutância do modelo, a forma de onda da tensão residual fornecida pelo modelo aproxima-se mais da

forma de onda da tensão residual medida, conseqüentemente, obtém-se um maior valor de R^2 . Contudo, os valores de indutância necessários para o correto ajuste são muito superiores ao relatado na literatura ($1 \mu\text{H}/\text{m}$), em até 50 vezes, mesmo depois de realizada a compensação indutiva. Além disso, existia um comportamento atípico, em que a indutância necessária diminuía à medida que a amplitude da corrente aumentava. Autores como Tominaga et al. (1979) e Haddad e Naylor (1999) modelaram esse comportamento utilizando indutâncias que diminuía seu valor com o aumento da amplitude da corrente, porém, fisicamente isso não é aceitável.

O comportamento da indutância não linear pode ainda está associado ao acoplamento indutivo existente entre o arranjo de medição e o varistor, explicado no final do Capítulo 3. Por isso, faz-se necessário realizar um estudo aprofundado sobre o acoplamento indutivo.

6.4 Validação do MEP na Região de Altas Correntes

Os resultados de simulação do MEP, modelo IEEE e modelo Convencional operando na região de altas correntes serão analisados. Inicialmente, serão analisadas as formas de onda da tensão residual dos modelos, obtidas em resposta à aplicação de impulsos de corrente com tempos de frente entre 1 e 8 μs e amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA. Em seguida, serão analisados os valores de erros do pico da tensão residual e erros de energia. Por fim, serão analisados os valores do coeficiente de determinação (R^2) em relação à forma de onda da tensão residual.

6.4.1 Análises das Formas de Onda da Tensão Residual

Nas Figuras 6.15 a 6.18 são mostradas as formas de onda dos impulsos de corrente medidos (I_{med}), as respectivas tensões residuais medidas e compensadas (V_{med}), fornecidas na simulação do MEP (V_{MEP}), do modelo Convencional (V_{CONV}) e do IEEE (V_{IEEE}). As curvas foram obtidas de algumas amostras de varistores, dos seis diferentes tipos, operando na região de altas correntes, submetidos a impulsos de corrente com formas de onda 1,5/26 μs , 3/6 μs , 4/10 μs e 8/20 μs e amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA, conforme descrito no Capítulo 4.

Conforme visualizado na Figura 6.15, o modelo IEEE apresentou *overshoot* na tensão residual quando submetido ao impulso de corrente com frente de onda rápida ($1,5/26 \mu s$). Esse comportamento não foi verificado nos resultados de medição. O MEP não apresentou *overshoot* e a sua forma de onda é similar à medida.

Para o impulso de corrente $3/6 \mu s$ mostrado na Figura 6.16, observa-se que a resposta de tensão no modelo IEEE apresentou um valor de pico mais adiantado que o valor de pico da tensão residual medida, indicando que o modelo IEEE apresentou uma indutância maior que a verificada nos varistores avaliados.

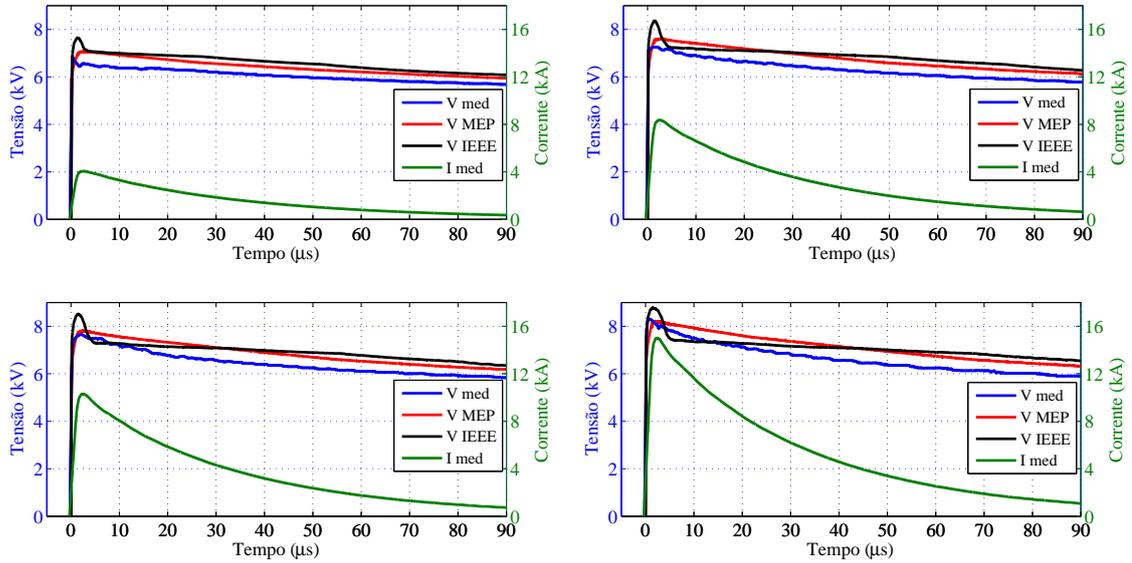
Além disso, o modelo IEEE apresentou uma queda de tensão inesperada e divergente dos sinais medidos. Esse comportamento anômalo já foi reportado em Bayadi et al. (2003). Já o MEP não apresentou nenhum comportamento anômalo, e os valores de pico da tensão residual estão muito próximos dos valores medidos. Entretanto, observam-se no MEP valores de tensão inferiores aos valores medidos nos instantes de tempo iniciais, e superiores nos instantes finais. Esta diferença de comportamento pode ser minimizada aumentando consideravelmente o valor da indutância do modelo, contudo, um valor elevado de indutância para um varistor de pequenas dimensões não é esperado. Isso sugere que ainda pode existir uma tensão indutiva adicionada à verdadeira tensão residual, mesmo depois de realizada a compensação.

No caso do impulso de alta corrente ($4/10 \mu s$), mostrado na Figura 6.17, observa-se o mesmo comportamento no modelo IEEE verificado para o impulso de corrente $3/6 \mu s$, ou seja, pico da tensão residual adiantado da tensão medida e uma queda de tensão inesperada, principalmente para as amplitudes de corrente mais elevadas. Na Figura 6.17 também é visualizada a resposta do modelo Convencional. Nota-se que a forma de onda da tensão residual no modelo Convencional é próxima da forma de onda da tensão residual medida, contudo, apresenta valores de tensão superiores à tensão residual medida, resultando em elevados erros de energia e valor de pico na tensão residual.

Para o impulso de corrente atmosférico padrão ($8/20 \mu s$) mostrado na Figura 6.18, observa-se um bom desempenho do modelo IEEE. Os bons resultados apresentados pelo IEEE para esta forma de onda específica devem-se ao fato dos parâmetros do modelo IEEE serem ajustados para o impulso de corrente atmosférico padrão. Já o MEP apresenta bons

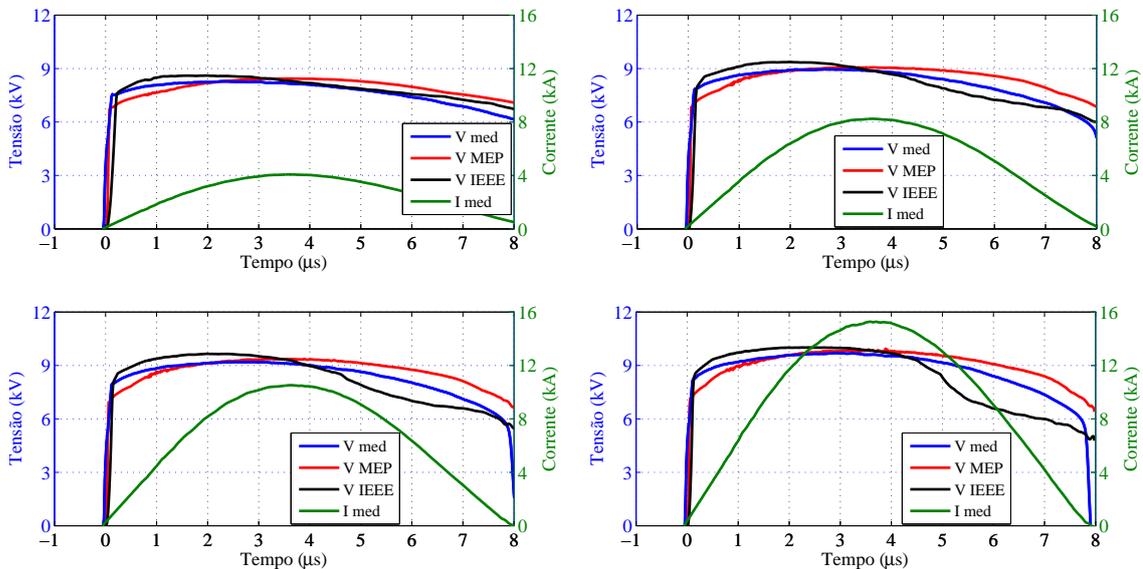
resultados quanto ao valor de pico da tensão residual, mas a diferença nos valores de tensão nos instantes de tempo iniciais e finais é constatada novamente.

Figura 6.15 – Formas de onda do impulso de corrente $1,5/26 \mu\text{s}$ aplicado ao varistor E1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA.



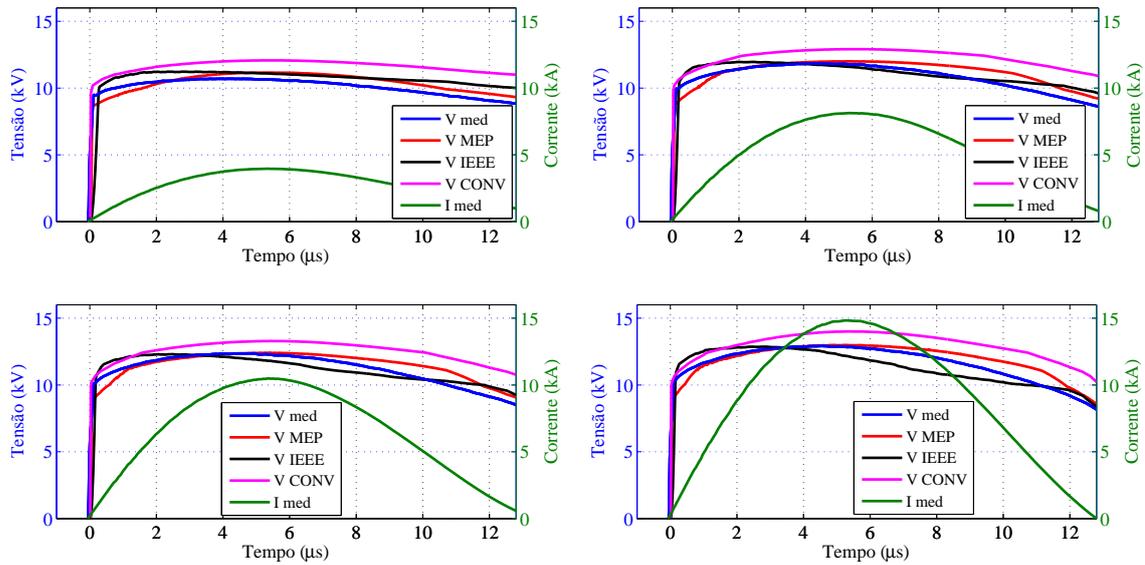
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.16 – Formas de onda do impulso de corrente $3/6 \mu\text{s}$ aplicado ao varistor D1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA.



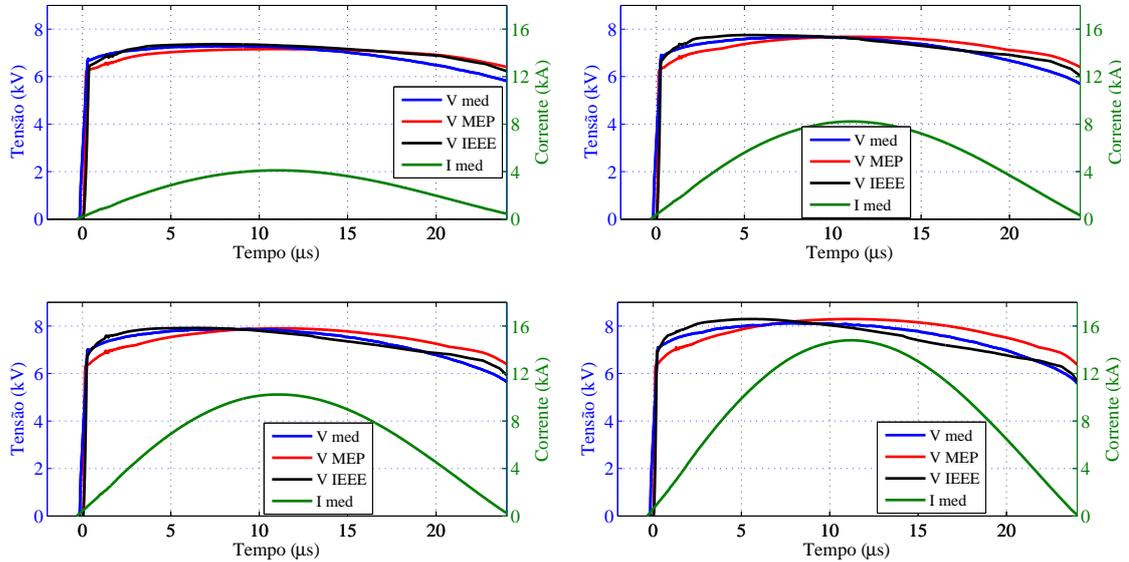
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.17 – Formas de onda do impulso de corrente $4/10 \mu\text{s}$ aplicado ao varistor A1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.18 – Formas de onda do impulso de corrente $8/20 \mu\text{s}$ aplicado ao varistor C1, e suas respectivas tensões residuais obtidas para amplitudes de 4, 8, 10 e 15 kA.

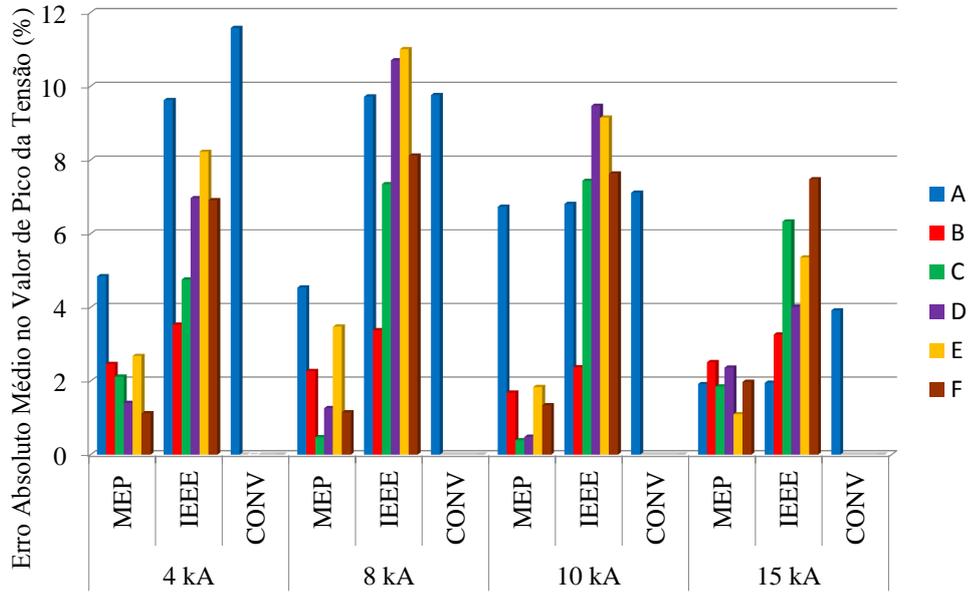


Fonte: Produzida pelo autor.

6.4.2 Análises de Erros no Valor de Pico da Tensão Residual

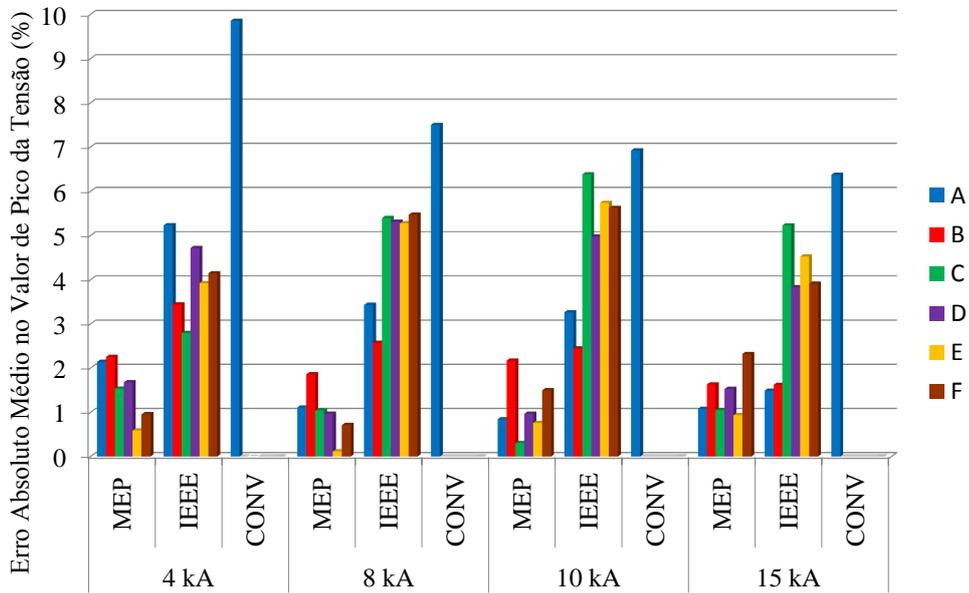
Os resultados obtidos para os erros nos valores de pico das tensões residuais no MEP e nos modelos IEEEE e Convencional, na região de altas correntes, são apresentados nas Figuras 6.19 a 6.22, calculados conforme a Equação 6.2.

Figura 6.19 – Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 1,5/26 μ s.



Fonte: Produzida pelo autor.

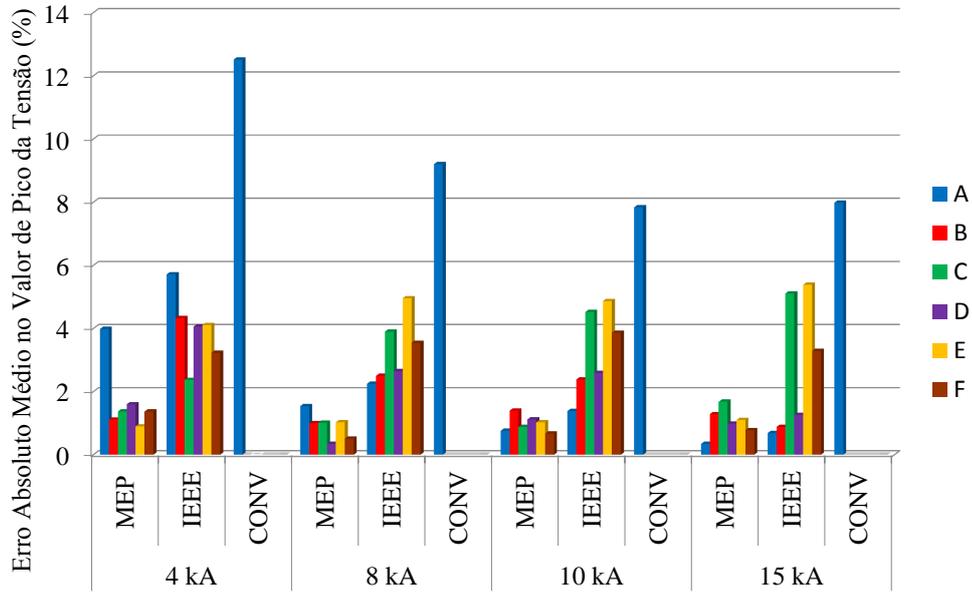
Figura 6.20 – Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 3/6 μ s.



Fonte: Produzida pelo autor.

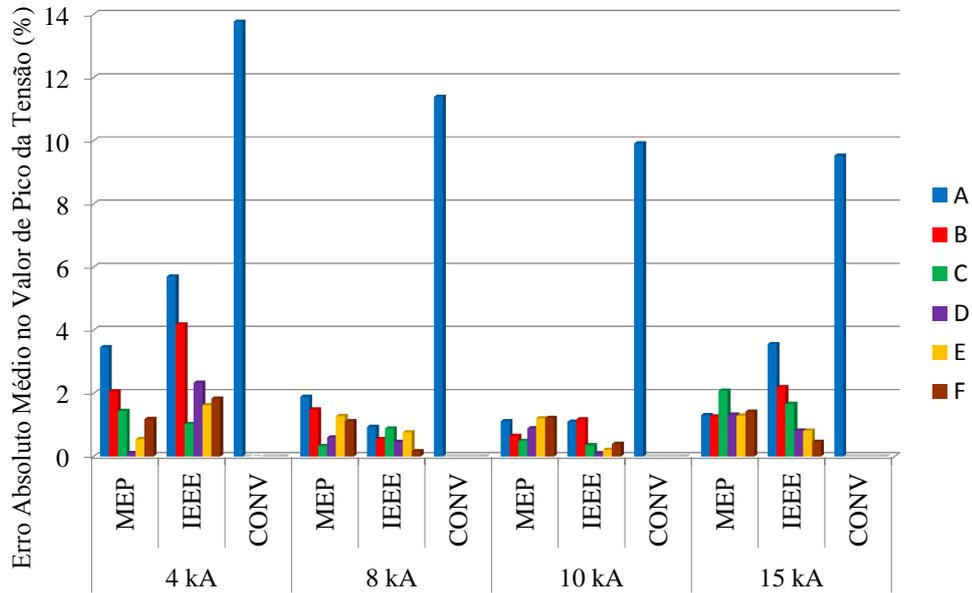
A partir dos gráficos de barra apresentados, verifica-se que os erros no valor de pico da tensão residual variam de acordo com o tipo de varistores ensaiados e com as amplitudes e formas de ondas dos impulsos de corrente aplicados. Na maioria dos casos é verificado o bom desempenho do MEP frente aos demais modelos avaliados.

Figura 6.21 – Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 4/10 μ s.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.22 – Erro percentual absoluto médio no valor de pico da tensão residual para o impulso de corrente 8/20 μ s.



Fonte: Produzida pelo autor.

Nos impulsos mostrados nas Figuras 6.19 a 6.22, observa-se que os erros no modelo IEEE e Convencional possuem valores bem menores que os obtidos para o impulso de corrente de manobra 30/60 μ s. Em praticamente todos os casos, o modelo Convencional apresentou erros superiores ao MEP e modelo IEEE. O modelo Convencional obteve erros

elevados de até 13,7% para o impulso de corrente 8/20 μs e amplitude de 4 kA. Na maioria dos casos os valores de erros estavam acima de 6%. Os elevados valores de erros podem estar relacionados com erros na medição da tensão residual e conseqüentemente na construção da curva $V-I$ do supressor de surto de ZnO.

Os maiores valores de erro atribuídos ao modelo IEEE foram para os impulsos de corrente com frentes de onda mais rápidas, 1,5/26 μs e 3/6 μs . Para o impulso de corrente 1,5/26 μs o erro máximo foi de 11% para o varistor tipo E submetido à amplitude de 8 kA. Este valor de erro está relacionado ao *overshoot* presente na tensão residual no modelo IEEE. Já para o impulso de corrente 3/6 μs , o erro máximo foi de 6,4% para o varistor tipo C submetido à amplitude de 10 kA. Para o impulso de corrente 4/10 μs os valores de erros ficaram compreendidos entre 0,6 e 5,7%. No caso do impulso de corrente de descarga atmosférica padrão (8/20 μs), a maioria dos erros foram inferiores a 2%, apresentando um bom resultado para essa forma de onda.

O MEP apresentou melhores resultados na maioria dos casos analisados. Assim como para o modelo IEEE, o maior erro de pico da tensão residual foi para o impulso de corrente 1,5/26 μs , no entanto, com valor de apenas 6,7%, frente aos 11% do modelo IEEE. Para a maioria dos casos, os erros do MEP foram inferiores a 2,5%. Para o impulso de corrente 3/6 μs , o bom desempenho do MEP também foi verificado, com erros menores que 2,4% para os casos avaliados, e menores que 1,7% na maioria dos casos. Para os impulsos de corrente 4/10 μs e 8/20 μs o bom desempenho do MEP também é verificado, obtendo erros inferiores a 1,5% na maioria dos casos, e todos inferiores a 4%.

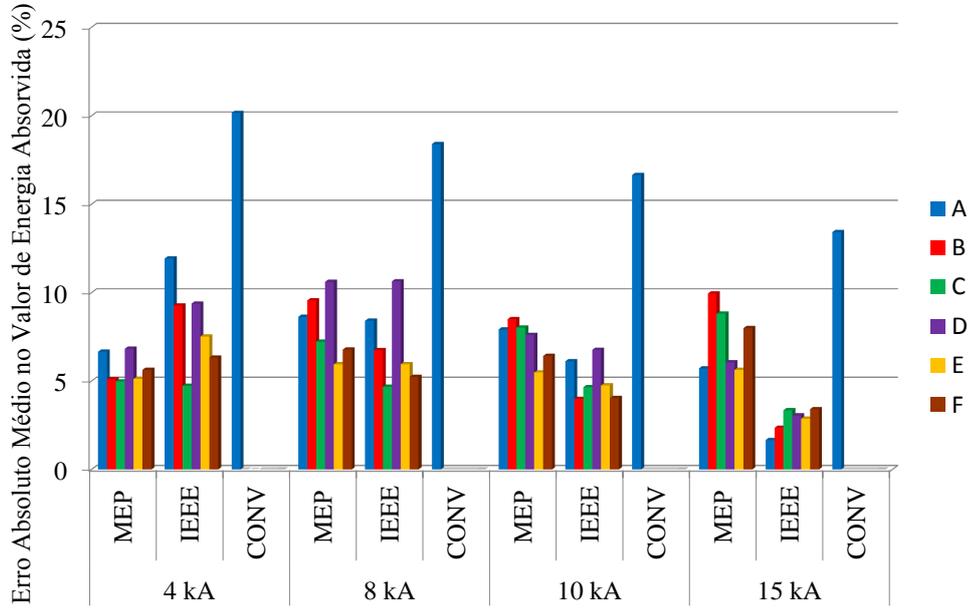
6.4.3 Análises de Erros no Valor da Energia Absorvida

Os resultados obtidos para os erros nos valores de energia absorvida na região de altas correntes são apresentados nas Figuras 6.23 a 6.26, calculados conforme a Equação 6.5.

A partir dos gráficos apresentados, é possível constatar que o modelo Convencional apresentou elevados valores de erros de energia absorvida, maiores que 8% para todos os casos avaliados, atingindo um erro máximo de 20% quando submetido ao impulso de corrente 1,5/26 μs com amplitude de 4 kA. Como relatado nas seções anteriores, os elevados valores de erros para o modelo Convencional podem estar relacionados com erros

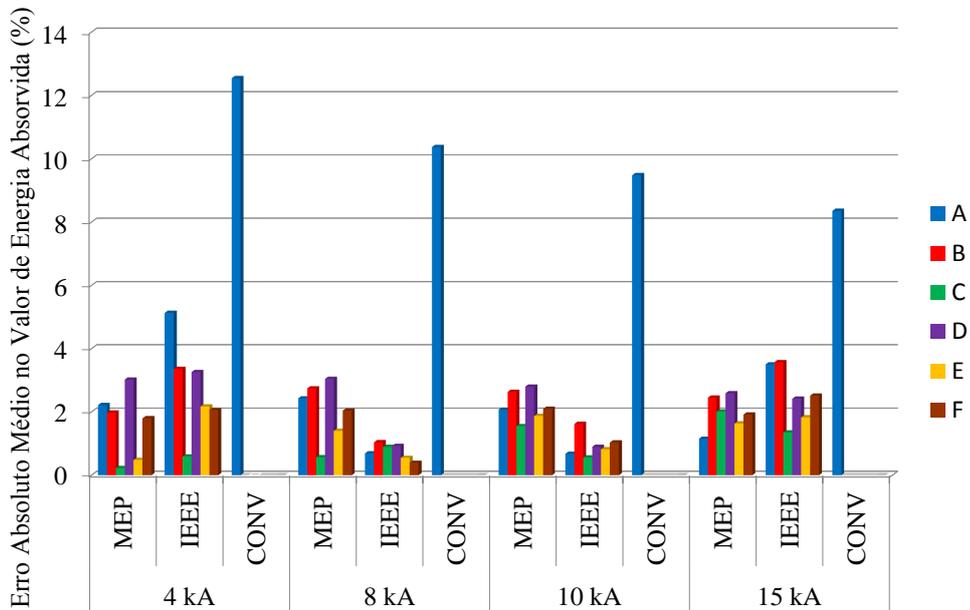
de medição, e conseqüentemente, erros na construção da curva $V-I$.

Figura 6.23 – Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente $1,5/26 \mu s$.



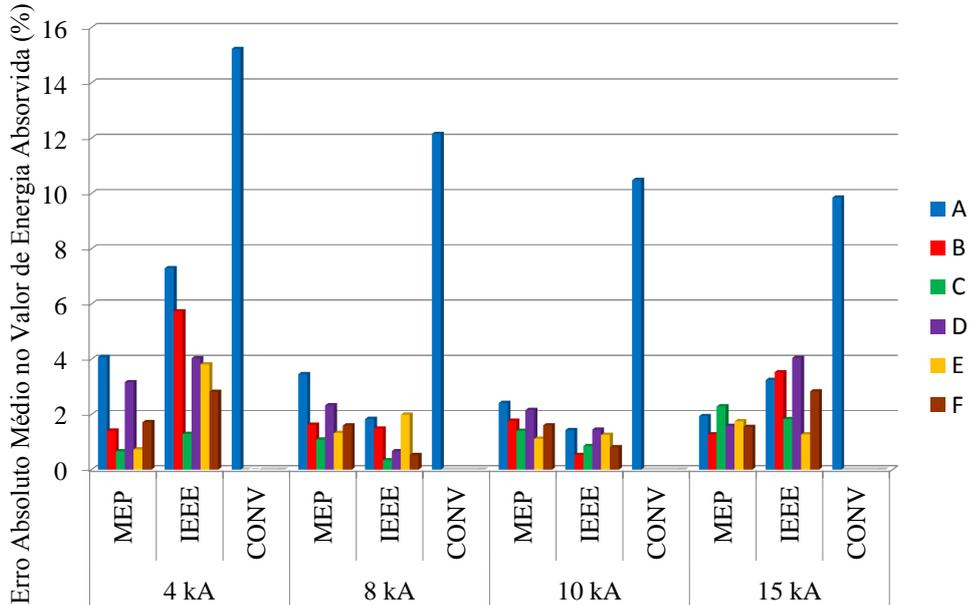
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.24 – Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente $3/6 \mu s$.



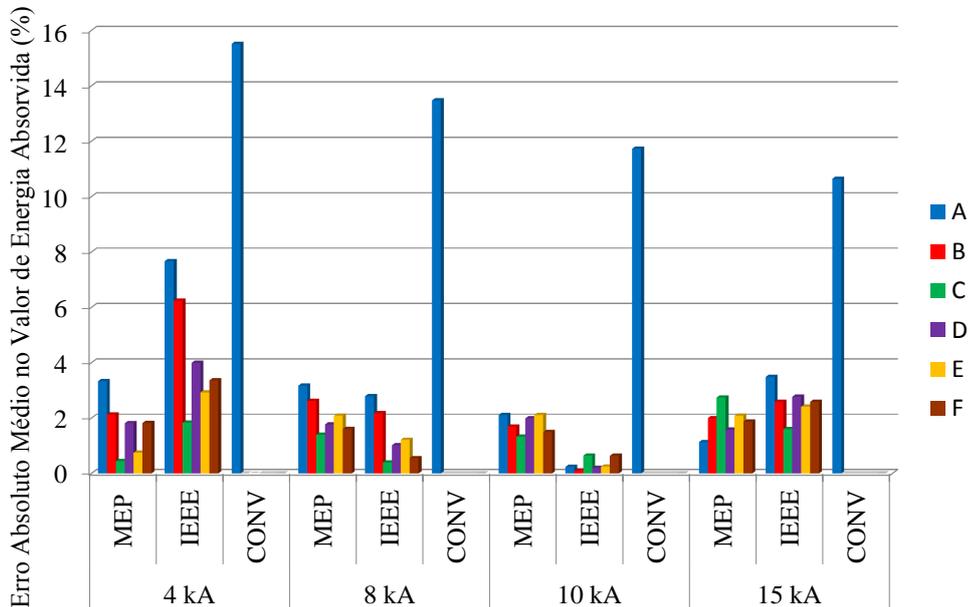
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.25 – Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente 4/10 μs .



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.26 – Erro percentual absoluto médio no valor de energia absorvida para o impulso de corrente 8/20 μs .



Fonte: Produzida pelo autor.

O modelo IEEE apresentou valores de erros maiores para o impulso de corrente 1,5/26 μs , principalmente quando submetido a amplitudes menores (4 e 8 kA). O erro máximo foi de 11,9% para o varistor tipo A, quando submetido à amplitude de 4 kA. Para

os demais impulsos de corrente, os erros foram menores que 4% na maioria dos casos. Os maiores erros também foram obtidos para as menores amplitudes de corrente. De forma geral, o modelo IEEE obteve um bom desempenho quanto à capacidade de absorção de energia para impulsos de corrente na região de altas correntes.

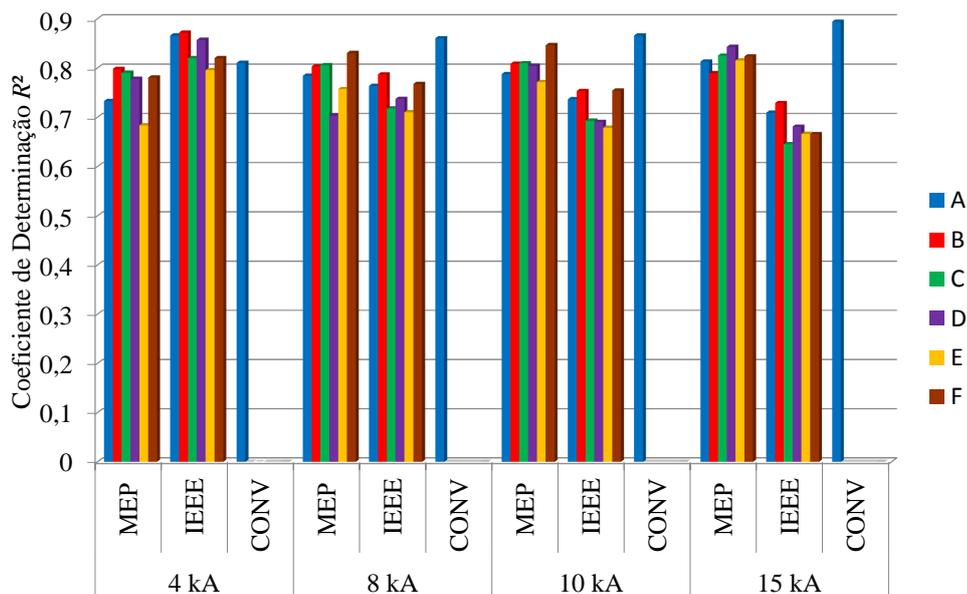
O MEP também apresentou erros maiores de energia para o impulso de corrente com tempo de frente mais rápido ($1,5/26 \mu s$), de até 10,6% para o varistor tipo D, quando submetido à amplitude de 8 kA. Os erros no MEP foram mais uniformes que para o modelo IEEE. Para os demais impulsos de corrente, os erros foram menores que 3% na maioria dos casos, obtendo um bom desempenho quanto à representação da capacidade de absorção de energia pelo supressor de surto de ZnO.

Os valores dos erros de energia obtidos com o MEP não foram muito superiores àqueles obtidos com o modelo IEEE, porém, o MEP apresentou valores de erros mais uniformes, enquanto o modelo IEEE apresentou variações significativas de erros em função da amplitude de corrente, de mais de 100% em alguns casos.

6.4.4 Análises da Estatística R^2 para a Tensão Residual

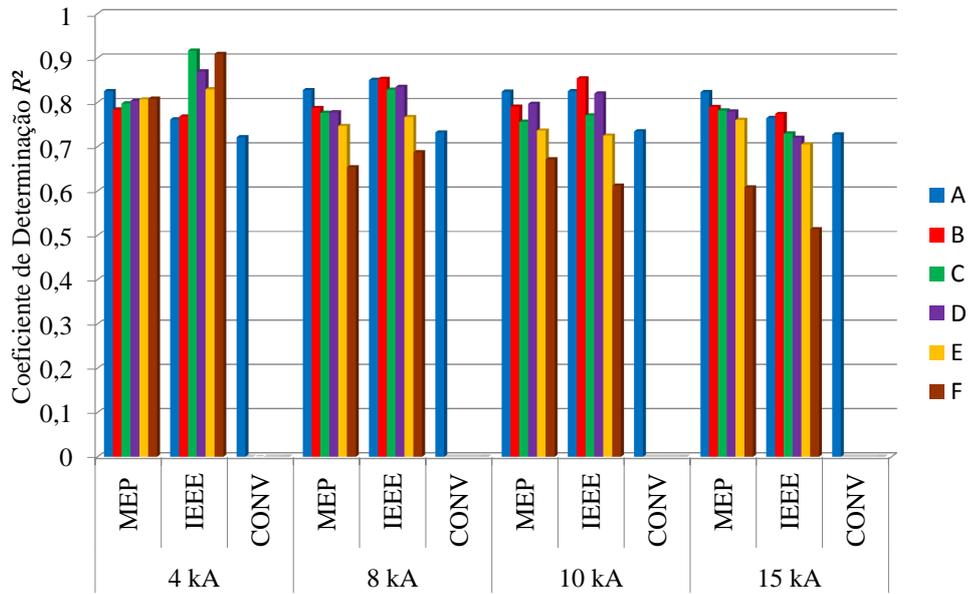
Os resultados obtidos da análise da estatística R^2 são apresentados nas Figuras 6.27 a 6.30, calculados conforme a Equação 6.6.

Figura 6.27 – Estatística R^2 para o impulso de corrente $1,5/26 \mu s$.



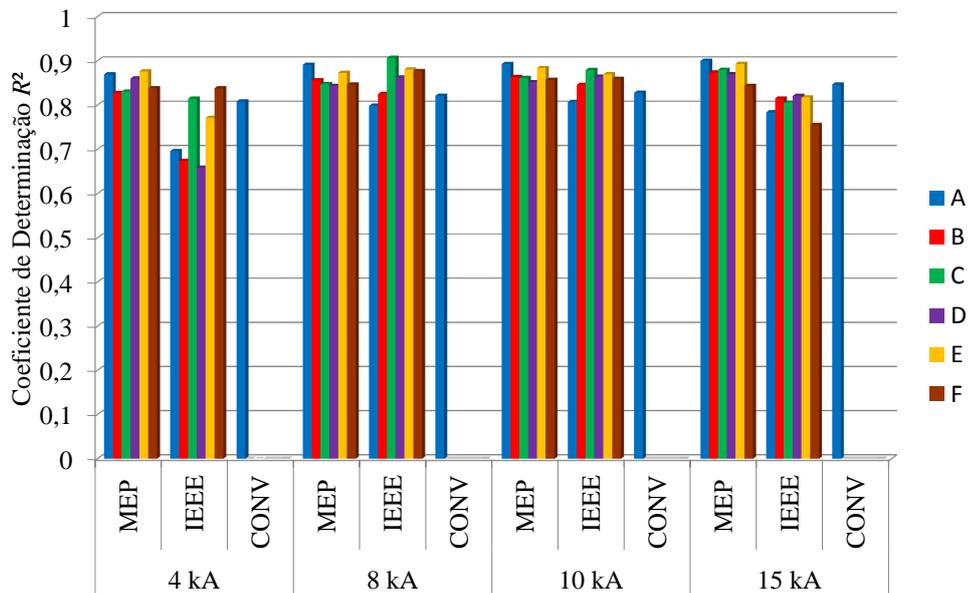
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.28 – Estatística R^2 para o impulso de corrente 3/6 μs .



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.29 – Estatística R^2 para o impulso de corrente 4/10 μs .



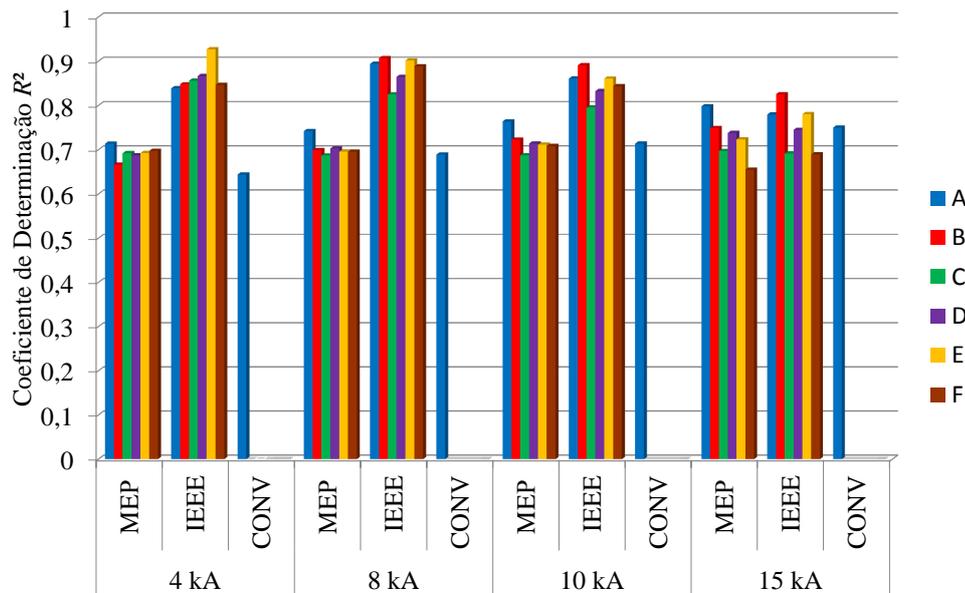
Fonte: Produzida pelo autor.

A partir dos resultados calculados para o R^2 , é possível avaliar se a forma de onda das tensões residuais fornecidas pelo MEP, modelo IEEE e modelo Convencional, correspondem ao sinal medido em laboratório.

Observa-se que os três modelos apresentaram na maioria dos casos, R^2 superiores a 0,7, ou seja, para a maioria dos casos os modelos conseguiram representar pelo menos 70%

da forma de onda da tensão residual medida. Para o impulso de corrente $8/20 \mu\text{s}$ observa-se maiores valores de R^2 no modelo IEEEE em relação ao MEP e modelo Convencional. A superioridade do modelo IEEEE para essa forma de onda específica deve-se ao fato dos parâmetros do modelo IEEEE serem ajustados para esse impulso de corrente.

Figura 6.30 – Estatística R^2 para o impulso de corrente $8/20 \mu\text{s}$.



Fonte: Produzida pelo autor.

Como relatado na Seção 6.3.4, as diferenças nas formas de onda do MEP em relação às formas de onda das tensões residuais medidas podem estar relacionadas à existência de tensão indutiva adicionada à verdadeira tensão residual, mesmo após realizada a compensação. Portanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado sobre o acoplamento indutivo presente na medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO.

Pelo exposto, os resultados obtidos com o MEP possuem variações para os diferentes tipos de varistores e para as diversas formas de onda de impulsos de corrente analisadas. As variações nos resultados podem ser atribuídas à resposta dos varistores analisados, que possivelmente possuem diferentes quantidades de dopantes e de alguns materiais utilizados no processo de fabricação. A maioria dos valores de erros de pico na tensão residual fornecidos pelo MEP são inferiores a 5%. Esses valores de erros são considerados baixos, pois, de acordo com Pereira (1999) o processo de fabricação pode apresentar dispersão de até 5%, para um mesmo tipo de varistor, quando fabricado em lotes diferentes.

Capítulo 7

Estudos Sistêmicos com o Modelo Elétrico Proposto

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises de simulações realizadas com o MEP, e os modelos Convencional e IEEE, em sistemas elétricos simulados, fornecidos por uma concessionária de energia elétrica. Os sistemas elétricos foram modelados sobre parâmetros reais. As simulações foram realizadas utilizando o *software* ATP.

Os seguintes estudos foram realizados com os modelos supracitados:

1. Energização da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV;
2. Rejeição de carga na LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV;
3. Incidência de descarga atmosférica com amplitude de 20 kA no lado de alta tensão do transformador de 500 kV de Camaçari IV.

Os estudos de energização e rejeição de carga na LT (Linha de Transmissão), foram realizados com objetivo de avaliar os possíveis níveis de energia absorvidos pelos supressores de surto de ZnO. Já o estudo de incidência de descarga atmosférica, foram realizados com objetivo de avaliar os níveis de sobretensões nos terminais do transformador (coordenação de isolamento), protegido por supressores de surto de ZnO.

Como critérios de análise da capacidade de absorção de energia pelo supressor de surto, foram adotados os valores de tensão residual nos terminais dos supressores de surto, em valores p.u. da tensão nominal do sistema; os valores de corrente nos supressores de surto e os valores de energia absorvida. Já no caso do estudo de coordenação de isolamento,

foram utilizados como critérios de análise os valores de tensão residual nos terminais do lado de alta tensão do transformador e do supressor de surto.

Além disso, avaliaram-se também quaisquer comportamentos anômalos de oscilação numérica ou resultados divergentes do comportamento teórico esperado. Os resultados de simulação dos modelos também foram comparados com os resultados de simulação sem supressores de surto. O objetivo dos estudos é avaliar se o comportamento do MEP condiz com o esperado, e se não há oscilação numérica ou instabilidade nos resultados de simulação.

Os supressores de surto de ZnO modelados são fabricados pela ABB, cuja referência é EXLIM T420-BM550 (ABB, 2014), com tensão nominal de 420 kV. Supressores de surto com essa tensão nominal são comumente especificados para sistemas de 500 kV. Na Tabela 7.1 são apresentadas as principais características dimensionais e elétricas do supressor de surto modelado. Na Tabela 7.2 são apresentados os valores de pico das tensões residuais para impulsos de corrente de manobra (30/60 μ s) e atmosférica (8/20 μ s).

Tabela 7.1 – Principais características do supressor de surto modelado.

Modelo	Tensão Nominal (kV _{rms})	MCOV (kV _{rms})	Cap. Abs. Energia (kJ)	Altura (m)	Classe de Descarga em Linha (IEC 60099-1, 1999)
EXLIM T	420	336	6468	4,175	Classe 5

Tabela 7.2 – Tensões residuais do supressor de surto modelado para impulsos de corrente de manobra (30/60 μ s) e atmosférica (8/20 μ s).

Modelo	Max. Tensão Residual (kV _{pico})					
	30/60 μ s			8/20 μ s		
	1 kA	2 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA
EXLIM T	807	830	846	888	924	998

No estudo de capacidade de absorção de energia pelo supressor de surto de ZnO, a curva característica $V-I$ utilizada no modelo Convencional, foi obtida no *datasheet* da ABB (ABB, 2004) para o impulso de corrente de manobra (30/60 μ s). Já no estudo de coordenação de isolamento, foi utilizada a curva $V-I$ para o impulso de corrente atmosférica (8/20 μ s), obtida no mesmo *datasheet*.

O sistema modelado para cada estudo realizado é descrito a seguir, junto com os resultados das simulações e análises. O tempo de simulação foi de 250 ms para os estudos de capacidade de absorção de energia pelo supressor de surto e 200 μ s para o estudo de coordenação de isolamento.

7.1 Energização da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV

Os modelos de supressores de surto de ZnO avaliados foram empregados em um estudo de Energização da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV do Sistema Interligado Nacional (SIN). Na Figura 7.1 é apresentado parte da interligação Norte-Nordeste, com destaque para as LT Teresina II - P. Dutra de 500 kV no SIN. Foi realizada uma adaptação do diagrama atual do ONS (ONS, 2016) para inclusão da LT C3 Teresina II - P. Dutra.

A energização ocorreu com as LT C2 e C3 energizadas. Os supressores de surto foram inseridos nas extremidades da LT C1. Para a manobra de energização, o procedimento consiste em fechar o disjuntor em P. Dutra e, com os terminais em Teresina II abertos, verificar os sinais de tensão nos terminais dos supressores de surto em Teresina II. O comando para energização da LT foi dado em $t_0 = 26,6$ ms de simulação.

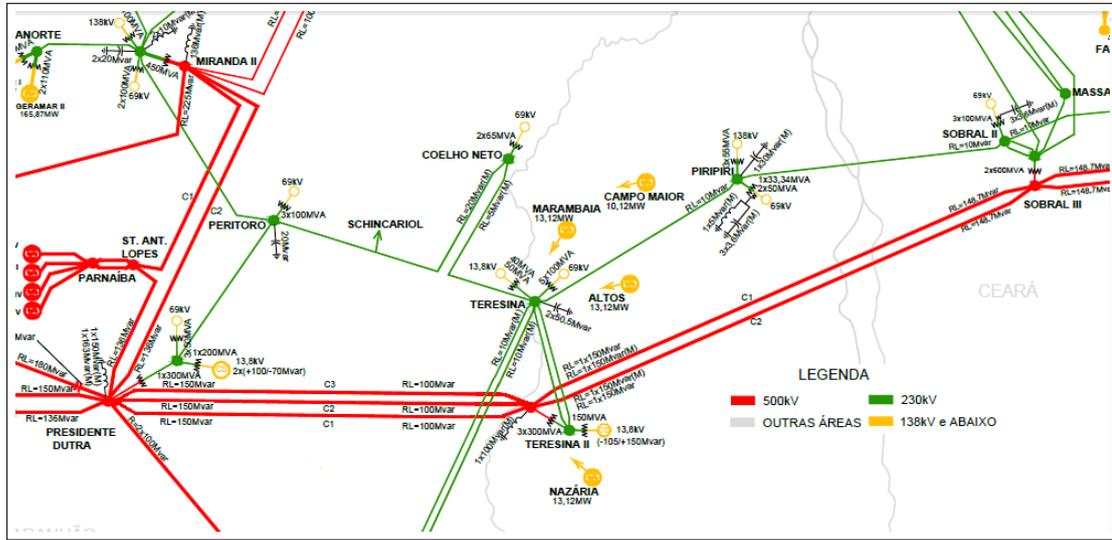
Nas Figuras 7.2, 7.3 e 7.4 são mostrados os resultados dos diferentes modelos utilizados na simulação.

A simulação de energização da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV apresenta valores máximos de sobretensão de 2,02 p.u. sem supressores de surto e 1,83 p.u. com o MEP, proporcionando uma redução de 0,19 p.u. na tensão, conforme pode ser analisado a partir da Figura 7.2. Os modelos Convencional e IEEE apresentaram redução de 0,15 p.u. e 0,23 p.u., respectivamente. Portanto, os valores máximos de sobretensões nos três modelos são semelhantes entre si. Após o transitório de manobra, os três modelos e também a condição sem supressor de surto, apresentaram um transitório temporário de aproximadamente 1,14 p.u., abaixo da tensão MCOV (1,16 p.u.) do supressor de surto modelado.

Os valores de pico e comportamento da corrente no modelo Convencional e MEP são semelhantes, com valor máximo de 193 A para o modelo Convencional e 253 A para o MEP. Os modelos Convencional e MEP operaram transitoriamente na região altamente não linear, e após o transitório operaram na região de baixas correntes, com amplitudes de aproximadamente 5 mA. O modelo IEEE apresentou um valor máximo de 348 A, e a resposta da corrente apresentou um comportamento divergente da resposta dos outros dois modelos. Após o período transitório, o modelo IEEE apresentou uma corrente senoidal com amplitude de 71 A. Tal diferença se dá pelo fato do modelo IEEE apresentar elementos não lineares que não estão caracterizados corretamente nas regiões de baixas correntes e alta não linearidade. Assim, quando o modelo é simulado no *software* ATP, os pontos do elemento A0 entre 0 e 10 A são interpolados por uma reta, bem como os pontos do elemento A1 entre 0 e 100 A. Isso faz com que o modelo IEEE apresente uma baixa impedância quando submetido a tensões próximas da tensão de regime do sistema e, conseqüentemente, conduza correntes de fuga elevadas.

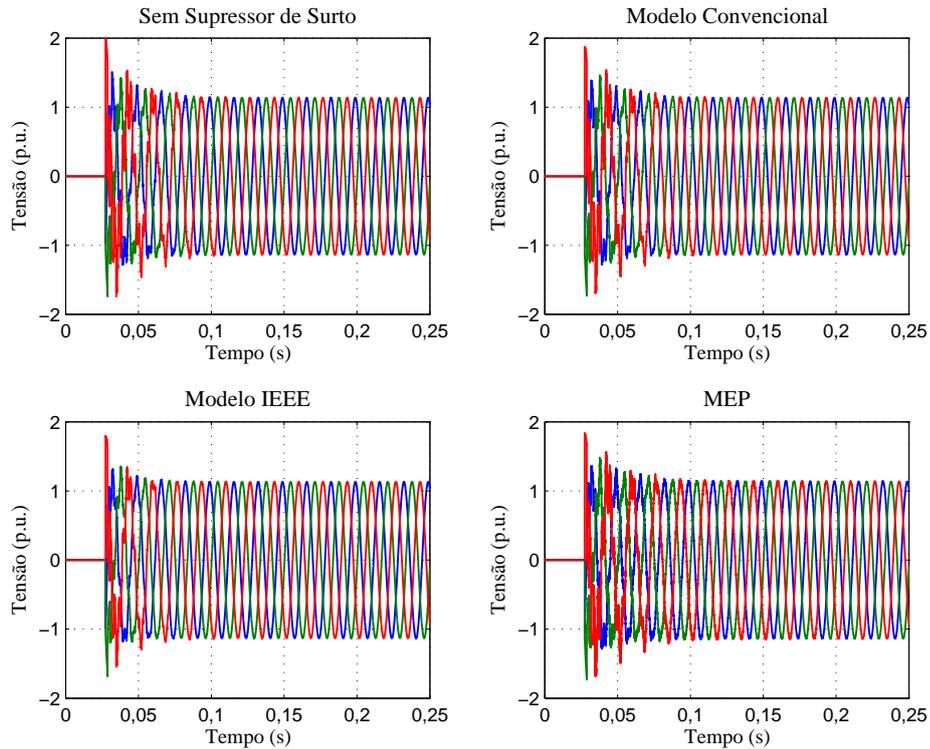
Em relação à energia, o MEP apresentou uma absorção de 132 kJ em 250 ms de simulação, com saturação da curva de energia, conforme pode ser visto na Figura 7.4. Logo, o modelo indica que não há superação da capacidade de absorção de energia pelo supressor de surto. Diante do esperado, é possível concluir que o supressor de surto apresentou nível de energia compatível para os níveis de tensão apresentados. O modelo Convencional apresentou uma absorção de 97 kJ em 250 ms de simulação e comportamento semelhante ao MEP. Já o modelo IEEE apresentou valores crescentes de energia com valor superior a 3700 kJ em 250 ms de simulação, discordando dos resultados do modelo Convencional e MEP. Esse comportamento anômalo do modelo IEEE foi atribuído à falta de representação na região de baixas correntes, onde verificaram-se correntes de fuga elevadas, de dezenas de ampères. Portanto, é possível afirmar que o modelo IEEE não é recomendado para representação do supressor de surto de ZnO nas regiões de alta não linearidade e baixas correntes.

Figura 7.1 – Diagrama Eletrogeográfico de Trecho da Rede de Alta Tensão do SIN com destaque para as LT Teresina II - P. Dutra de 500 kV.



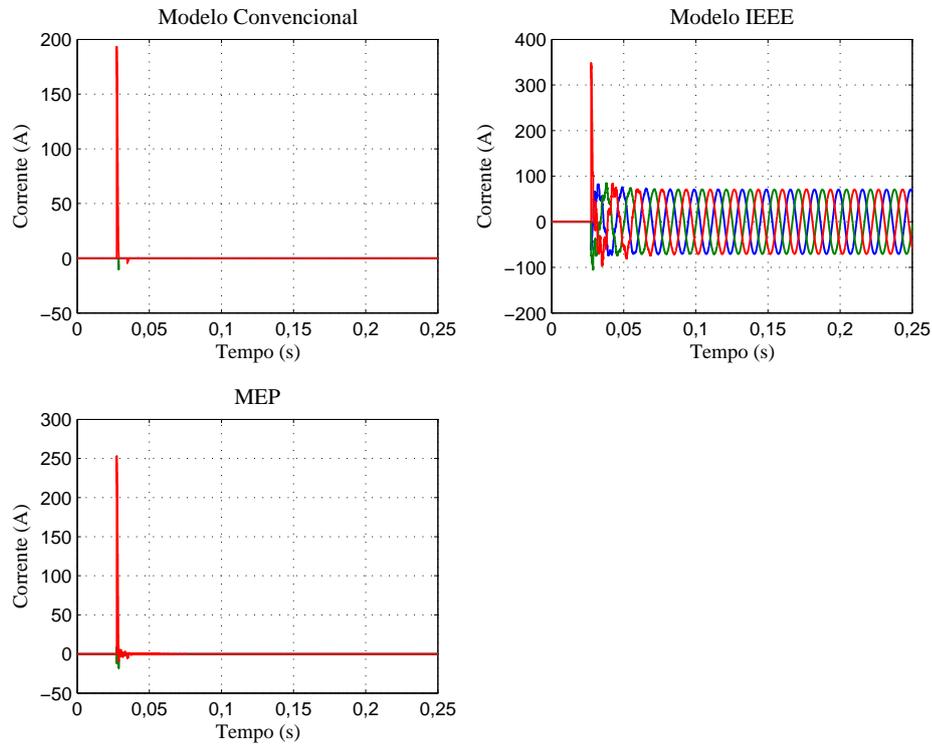
Fonte: Adaptada de ONS (2016).

Figura 7.2 – Níveis de tensão na energização da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV.



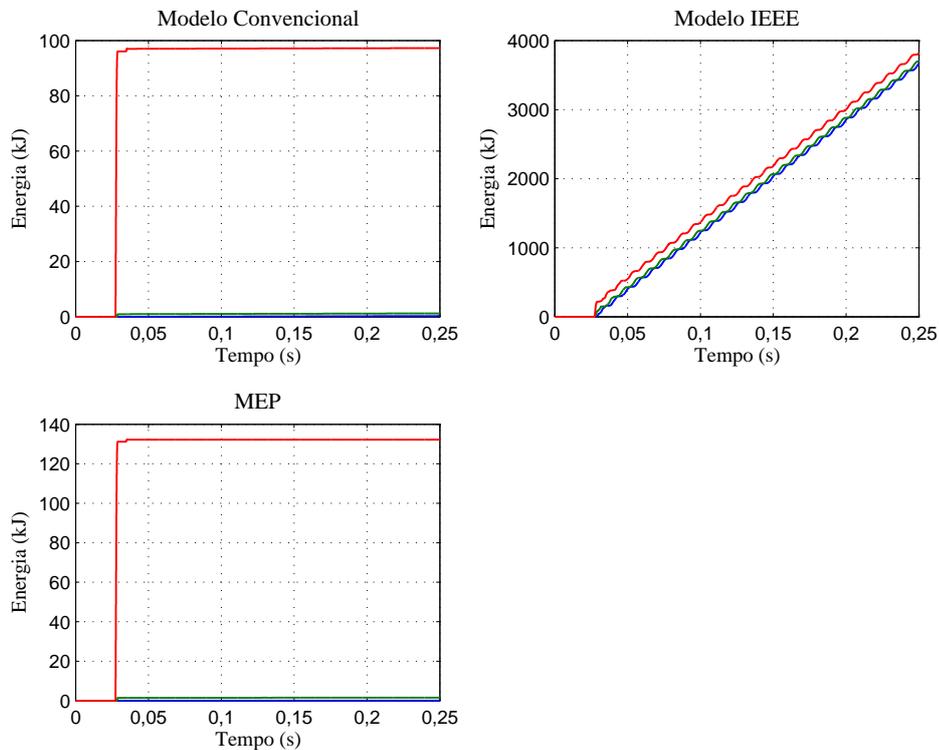
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 7.3 – Níveis de corrente nos supressores de surto da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV durante energização.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 7.4 – Níveis de energia nos supressores de surto da LT C1 Teresina II - P. Dutra de 500 kV durante energização.



Fonte: Produzida pelo autor.

7.2 Rejeição de Carga na LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV

Ainda com objetivo de avaliar os possíveis níveis de energia absorvidos pelos supressores de surto de ZnO, os modelos foram analisados mediante um estudo de Rejeição de Carga na LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV do SIN. Parte do sistema modelado é apresentado na Figura 7.1. A rejeição de carga analisada ocorreu devido a um curto-circuito monofásico na fase *A* do barramento de 500 kV de P. Dutra, aos 33,34 ms de simulação, seguido da abertura dos disjuntores da mesma subestação no instante 53,34 ms de simulação. Em seguida, aos 62,98 ms de simulação, ocorreu um curto-circuito monofásico na Fase *C* da saída da Linha C3 de P. Dutra para Teresina II, com subsequente abertura dos disjuntores em Teresina II, aos 162,98 ms de simulação.

Para análise, foram inseridos supressores de surto nas extremidades da LT C3 Teresina II - P. Dutra e nos terminais da LT C3 Teresina II - Sobral III. Optou-se por mostrar os sinais nos supressores de surto em P. Dutra, pois apresentaram sobretensões maiores que em Teresina II e Sobral III.

Nas Figuras 7.5, 7.6 e 7.7 são apresentados o desempenho dos diferentes modelos utilizados na simulação.

A simulação de rejeição de carga na LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV apresentou valores máximos de sobretensão de 3,08 p.u. sem supressores de surto e 2,00 p.u. com o MEP, proporcionando uma redução de 1,08 p.u., conforme pode ser analisado a partir da Figura 7.5. Portanto, essa simulação representa uma situação de maiores valores de tensão transitória de manobra e, por essa razão, permite avaliar satisfatoriamente o modelo em sua operação para transitórios de manobra. Os modelos Convencional e IEEE apresentaram valores máximos de 2,02 p.u. e 1,97 p.u., respectivamente. Entretanto, o modelo IEEE apresentou uma queda brusca de tensão após a abertura do disjuntor em Teresina II, discordando do modelo Convencional e MEP. Esse fato pode ter ocorrido devido ao baixo valor de impedância do modelo IEEE nas regiões de baixas correntes e alta não linearidade, fazendo com que as cargas nos terminais abertos da LT fossem rapidamente escoadas para a terra. Essa situação não representa o comportamento esperado, e mais

uma vez exclui o modelo IEEE para estudos envolvendo as regiões de baixas correntes e alta não linearidade.

Os valores máximos de corrente são similares nos três modelos avaliados, em torno de 1500 A. Entretanto, a forma de onda da corrente no modelo IEEE antes e durante os transitórios apresenta-se adicionada a um sinal de baixa frequência com amplitudes em torno de 70 A. A diferença está associada à falta de representatividade do modelo IEEE nas regiões de baixas correntes e alta não linearidade.

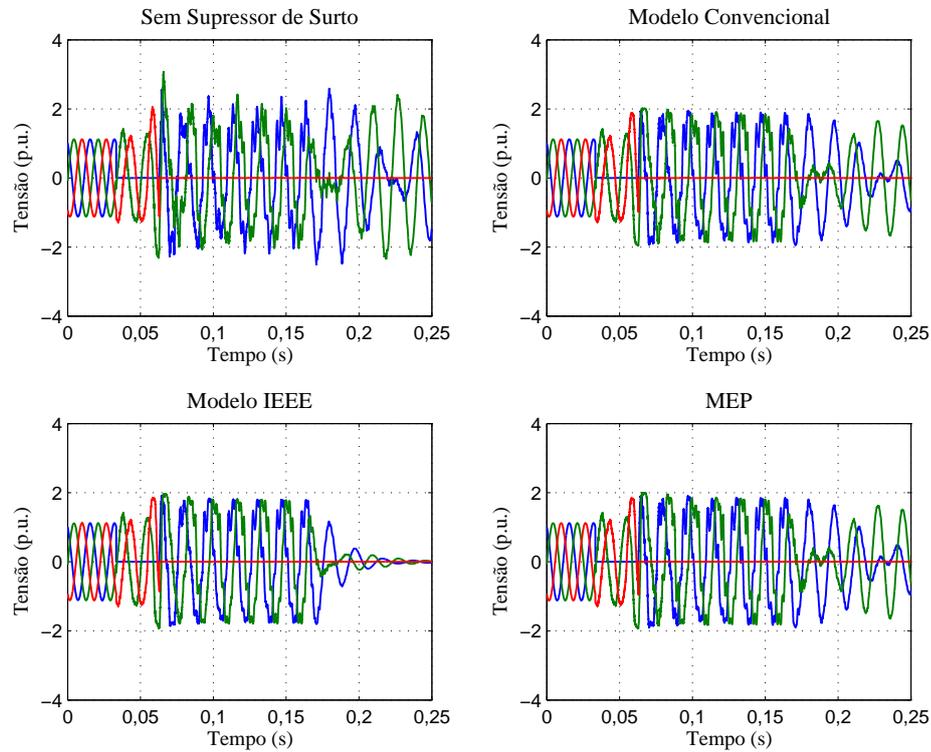
O MEP apresentou uma absorção de 6.963 kJ em 250 ms de simulação, aproximadamente 108% da capacidade de absorção energia pelo supressor de surto, como mostrado na Figura 7.7. Portanto, houve superação da capacidade de absorção de energia, e um supressor de surto com maior capacidade de absorção de energia deve ser testado.

No modelo Convencional a energia absorvida foi de 6.172 kJ em 250 ms de simulação, aproximadamente 95% da capacidade de absorção energia pelo supressor de surto. Portanto, não houve superação de energia utilizando o modelo Convencional. Já no modelo IEEE houve superação, entretanto o valor obtido foi de 11.200 kJ em 250 ms de simulação, muito superior ao esperado.

Os resultados do MEP nos dois estudos de absorção de energia foram condizentes com o esperado para o comportamento do supressor de surto de ZnO na região de alta não linearidade. Nessa região o supressor de surto de ZnO possui um comportamento elétrico predominantemente resistivo.

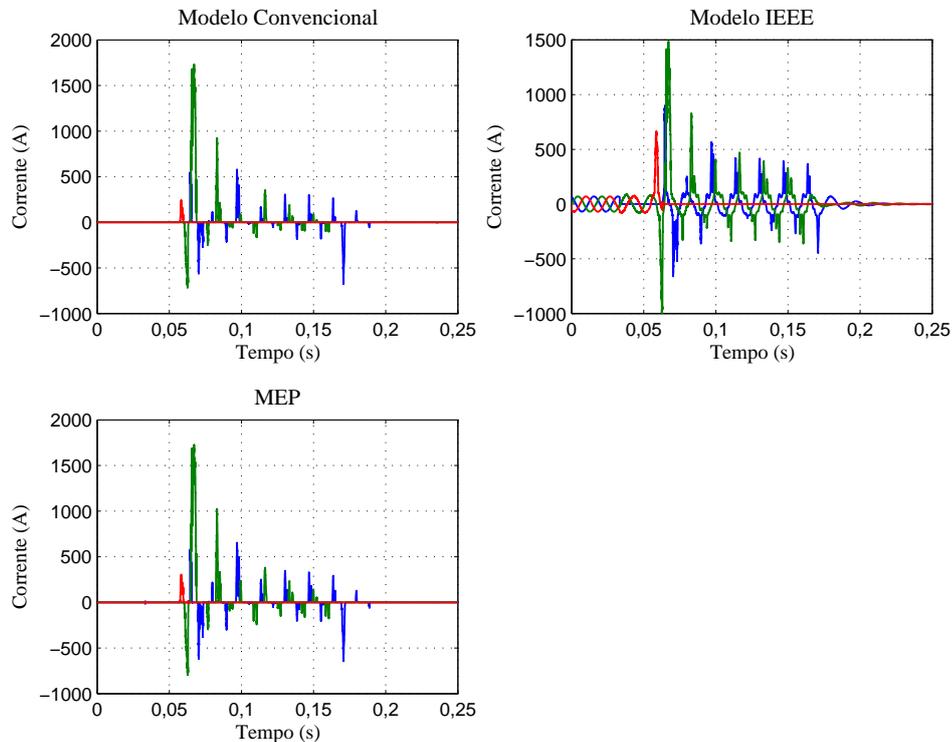
No estudo de rejeição de carga, os resultados do modelo IEEE apesar de apresentarem valores máximos de tensão e corrente muito próximos dos resultados do MEP e modelo Convencional, o valor de energia foi muito superior. Isso ocorreu devido ao modelo IEEE não representar corretamente as regiões de baixas correntes e alta não linearidade.

Figura 7.5 – Níveis de tensão durante rejeição de carga na LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV.



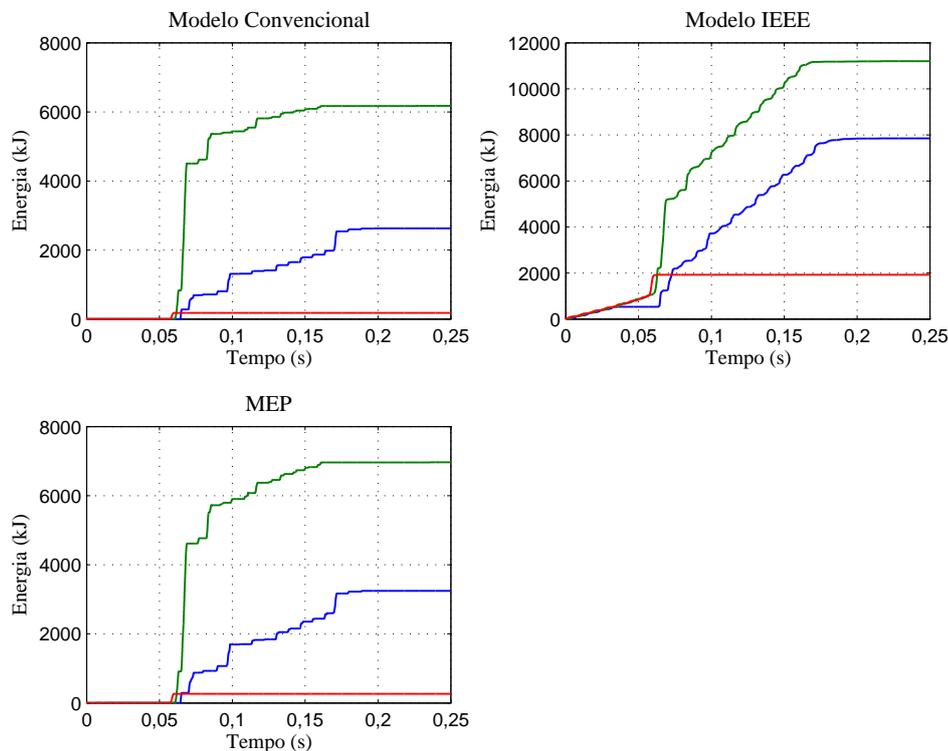
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 7.6 – Níveis de corrente nos supressores de surto da LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV durante rejeição de carga.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 7.7 – Níveis de energia nos supressores de surto da LT C3 Teresina II - P. Dutra de 500 kV durante rejeição de carga.



Fonte: Produzida pelo autor.

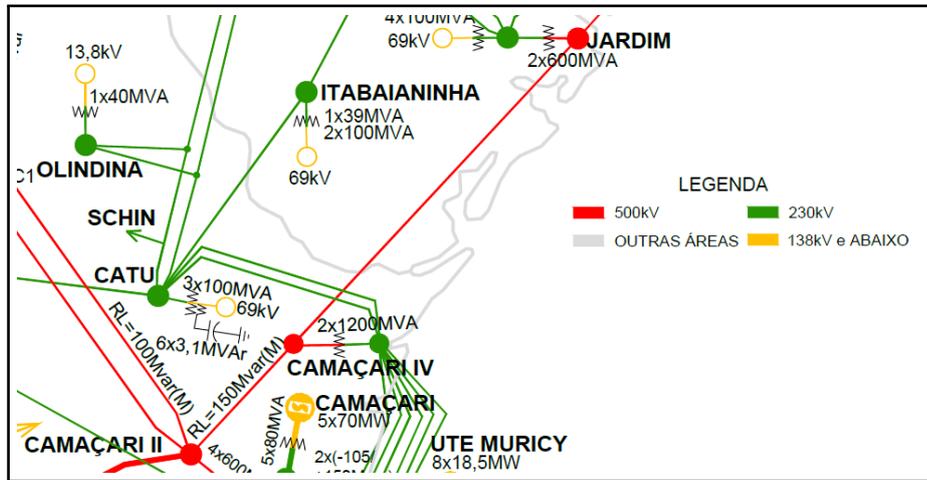
7.3 Incidência de Descarga Atmosférica com Amplitude de 20 kA no Lado de Alta Tensão do Transformador de 500/230 kV de Camaçari IV

Os modelos de supressor de surto também foram analisados mediante um estudo de Coordenação de Isolamento com aplicação de um impulso de corrente atmosférica com forma de onda $1/2 \mu\text{s}$ e amplitude de 20 kA no lado de alta tensão do transformador de 500/230 kV da subestação de Camaçari IV. Na Figura 7.8 é apresentado parte da interligação Norte-Nordeste, com destaque para a Subestação de 500 kV de Camaçari IV no SIN.

Na Figura 7.9 é apresentado parte do circuito elétrico monofásico, modelado para alta frequência, fornecido pela concessionária de energia. Apenas uma fase é necessária ser representada, pois apesar de existirem acoplamentos eletromagnéticos entre as três fases, na descarga atmosférica a sobretensão na fase atingida pela descarga de corrente é

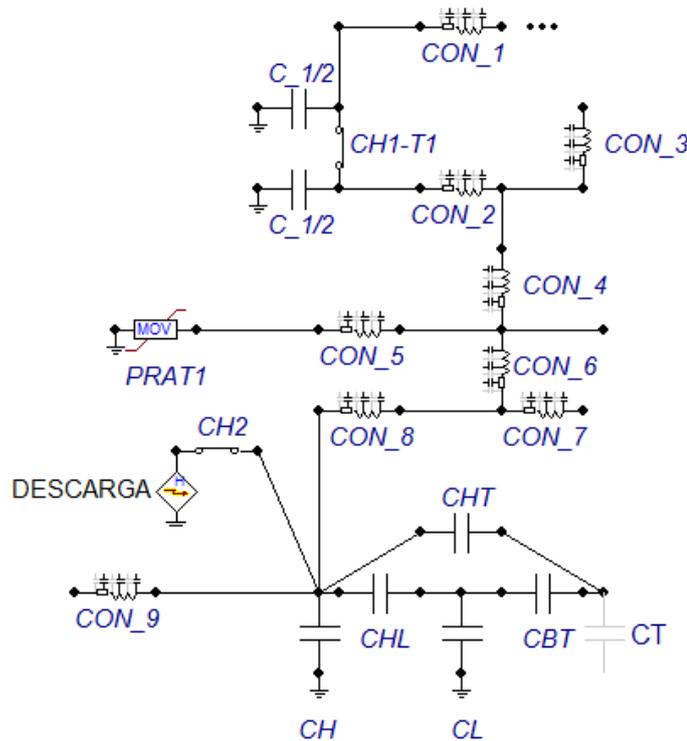
geralmente muito maior que as sobretensões nas fases adjacentes.

Figura 7.8 – Diagrama Eletrogeográfico de Trecho da Rede de Alta Tensão do SIN.



Fonte: (ONS, 2016).

Figura 7.9 – Parte do circuito elétrico da subestação de Camaçari IV modelado para alta frequência.



Fonte: Produzida pelo autor.

Em altas frequências, as capacitâncias e indutâncias de equipamentos e conexões devem ser consideradas na simulação. As perdas ôhmicas são desprezíveis e foram descon-

sideradas na simulação. O transformador foi representado pelas capacitâncias existentes entre os terminais de alta tensão (500 kV), baixa tensão (230 kV) e terciário (13,8 kV). Na utilização do modelo Convencional foi inserida uma indutância em série com a resistência não linear com valor de $1 \mu\text{H}/\text{m}$.

Na Tabela 7.3 são apresentados os valores dos parâmetros dos elementos mostrados na Figura 7.9. A capacitância do terciário do transformador (incluindo as buchas) não foi representada porque o seu valor é desconhecido. A simulação teve duração de $200 \mu\text{s}$.

Tabela 7.3 – Definição dos parâmetros dos elementos mostrados na Figura 7.9.

Parâm.	Definição	Valores			
		Z (Ohm/m)	V (m/s)	L (m)	C (pF)
CON_1	Conexão até a chave CH1-T1	447,06	3E+8	105,6	-
CON_2	Conexão de subida após a chave CH1-T1	447,06	3E+8	15,0	-
CON_3	Conexão sem cont. elétrica até o pórtico	447,06	3E+8	1,5	-
CON_4	Conexão até o supressor de surto PRAT1	447,06	3E+8	10,5	-
CON_5	Descida até o supressor de surto PRAT1	447,06	3E+8	10,5	-
CON_6	Conexão até o transformador	447,06	3E+8	9,6	-
CON_7	Conexão sem cont. elétrica até o pórtico	447,06	3E+8	1,5	-
CON_8	Descida até o transformador	447,06	3E+8	7,5	-
CON_9	Conexão sem cont. elétrica até o pórtico	447,06	3E+8	7,5	-
C_1/2	Metade da capacitância da chave CH1-T1	-	-	-	75,95
CH	Capacitância do lado de AT do TRAFO (incluindo as buchas)	-	-	-	6,115E+3
CHL	Capacitância entre AT e BT do TRAFO	-	-	-	6,313E+3
CHT	Capacitância entre AT e Terciário - TRAFO	-	-	-	1,0
CL	Capacitância do lado de BT do TRAFO (incluindo as buchas)	-	-	-	23,406E+3
CBT	Capacitância entre BT e Terciário - TRAFO	-	-	-	1,0
CT	Capacitância do Terciário do TRAFO (incluindo as buchas)	-	-	-	*

*O valor da capacitância do terminal terciário do transformador não é conhecido.

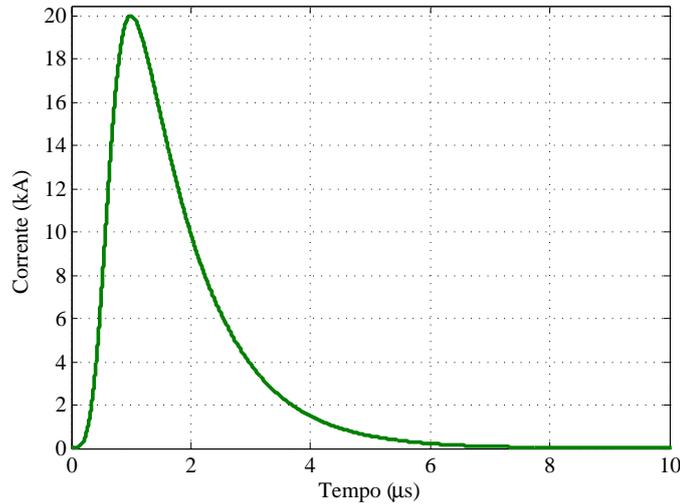
Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 7.10 é mostrada a forma de onda do impulso de corrente injetado no terminal de alta tensão do transformador.

No estudo de coordenação de isolamento utilizando injeção de descargas atmosféricas, o parâmetro a ser analisado é o valor de pico da tensão no equipamento ao qual o supressor de surto está protegendo, no caso em análise, o transformador. Na Figura 7.11 são mostradas as formas de onda da tensão nos terminais de alta tensão do transformador

e no supressor de surto, modelado por cada um dos três modelos avaliados. Também é mostrada a forma de onda da tensão no terminal do transformador sem supressor de surto.

Figura 7.10 – Forma de onda da descarga atmosférica aplicada no lado de AT do transformador de 500/230 kV de Camaçari IV.



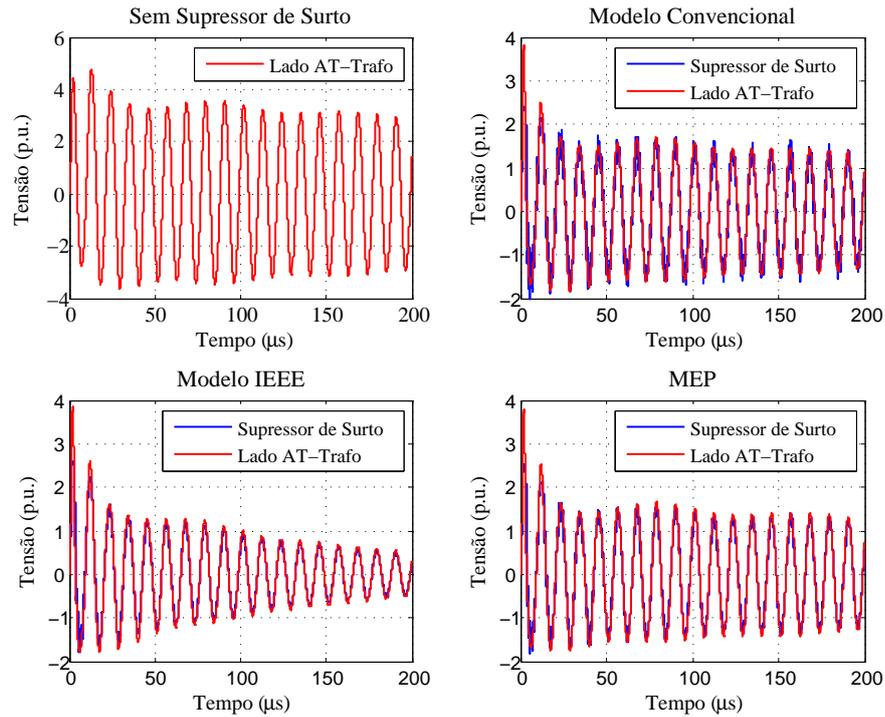
Fonte: Produzida pelo autor.

Observa-se na Figura 7.11 que caso não sejam utilizados supressores de surto o valor de pico da tensão no transformador é de 4,77 p.u. Este valor é superior à tensão suportável de um equipamento com tensão máxima de 525 kV, que é de 3,18 p.u. (1500 kV_{PICO}), de acordo com a norma IEC 60071-1 (2006). Com a utilização do supressor de surto, a sobretensão foi reduzida a 3,77 p.u., 3,80 p.u. e 3,84 p.u. para o MEP, modelo Convencional e modelo IEEE, respectivamente. Portanto, superou o Nível Básico de Isolamento (NBI) do transformador.

Entretanto, quando se analisa a sobretensão nos terminais do supressor de surto, conforme pode ser visto na Figura 7.11, constata-se que o valor de pico da tensão residual nos terminais do supressor de surto é inferior a 3,18 p.u. Isso acontece porque entre o supressor de surto e o terminal de alta tensão do transformador existem cabos de conexões, identificados na Figura 7.9 como CON_5 , CON_6 e CON_8 . Juntos os cabos possuem um comprimento de 27,6 m e impedância equivalente de aproximadamente $12,39 \text{ k}\Omega$, conforme pode ser verificado na Tabela 7.3. Devido a reflexões dos sinais de tensão e corrente nos cabos de conexão entre o supressor de surto e o transformador, a tensão no transformador é maior que a tensão no supressor de surto.

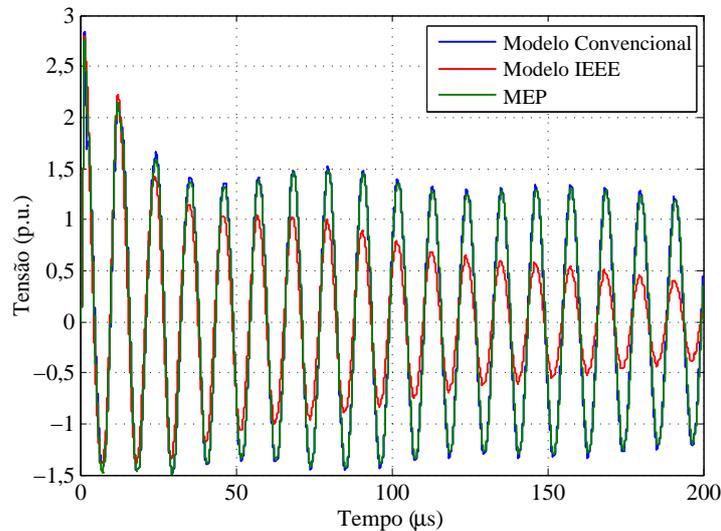
Na Figura 7.12 são mostradas as formas de onda das tensões no terminal de alta tensão do transformador para os três modelos avaliados, caso o supressor de surto seja conectado diretamente ao terminal de alta tensão do transformador. Neste caso a isolação do transformador suportaria a sobretensão.

Figura 7.11 – Níveis de tensão no supressor de surto e no lado de AT do transformador de 500/230 kV de Camaçari IV.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 7.12 – Níveis de tensão no lado de AT do transformador de 500/230 kV de Camaçari IV com o supressor de surto conectado no lado de AT do transformador.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Tabela 7.4 são apresentados os valores de pico das tensões no terminal de alta tensão do transformador sem supressor de surto (SSS), com supressor de surto conectado por cabo de 27,6 m de comprimento até o transformador (SSC), conforme apresentado na Figura 7.9, e com o supressor de surto conectado diretamente no terminal de alta tensão do transformador (SST). A diferença percentual entre a tensão no transformador com supressor de surto conectado por cabo de 27,6 m de comprimento até o transformador e conectado diretamente no terminal de alta tensão do transformador ($DIF_{SSC-SST}$) foi calculada utilizando a Equação 7.1.

$$DIF_{SSC-SST} = \frac{SSC - SST}{SSC} \cdot 100\%. \quad (7.1)$$

Tabela 7.4 – Valores de pico das tensões no terminal de alta tensão do transformador submetido à descarga atmosférica com amplitude de 20 kA.

Modelo	Tensão de Pico no Transformador (p.u.)			
	SSS	SSC	SST	$DIF_{SSC-SST}$ (%)
-	4,77	-	-	-
MEP	-	3,77	2,53	32,89
Convencional	-	3,80	2,38	37,37
IEEE	-	3,84	2,59	32,55

Fonte: Produzida pelo autor.

Os valores da diferença percentual mostrados na Tabela 7.4 evidenciam a importância de instalar os supressores de surto próximos ao equipamento a ser protegido.

Os resultados de simulação do MEP nos estudos sistêmicos envolvendo sobretensões de manobra e atmosférica foram satisfatórios. As formas de onda e amplitudes das tensões, correntes e energias foram compatíveis com o esperado. Não foram verificadas oscilações numéricas ou instabilidade nos resultados de simulação com o MEP.

Capítulo 8

Conclusões

Neste trabalho foi proposto um Modelo Elétrico de supressor de surto de ZnO capaz de representar suas características elétricas nas três regiões de operação. Para tanto, doze varistores de ZnO de cinco diferentes fabricantes foram submetidos a ensaios elétricos nas três regiões de operação, para diferentes valores de amplitude e forma de onda. A partir dos resultados dos ensaios, foi possível determinar o comportamento elétrico médio dos varistores de ZnO, em condições normais de operação e frente a diversos tipos de sobretensões.

Com base na revisão bibliográfica e nos resultados de medição em laboratório, foi idealizado um modelo elétrico para cada região de operação do supressor de surto de ZnO. Em seguida, esses modelos foram reunidos em um único, constituindo o MEP. Os parâmetros do MEP foram relacionados com as características elétricas e dimensionais dos supressores de surto de ZnO, de forma que todos os parâmetros fossem encontrados facilmente no *datasheet* do fabricante.

Com objetivo de evitar possíveis oscilações numéricas espúrias durante a simulação do MEP em programas computacionais, o modelo incorporou duas resistências exclusivamente para este fim. Nos resultados do MEP utilizando a base de dados construída não foi verificada a presença de oscilações numéricas espúrias.

Na região de baixas correntes, o MEP foi capaz de reproduzir a capacitância e resistência não linear do supressor de surto de ZnO. Além do mais, representou, com boa exatidão, a predominância da componente capacitiva da corrente de fuga e a distorção harmônica devido à não linearidade da componente resistiva.

Na região altamente não linear, o MEP foi capaz de reproduzir o comportamento resistivo não linear, e o efeito indutivo verificado no supressor de surto de ZnO quando submetido a sobretensões de manobra.

Na região de altas correntes, o MEP representou o comportamento resistivo e o efeito indutivo dos varistores de ZnO. O MEP também representou o efeito dinâmico verificado nos supressores de surto de ZnO.

As respostas do MEP foram comparadas com os resultados de medição e dos modelos Convencional e IEEE. Foram utilizados como parâmetros de comparação os erros nos valores de pico (corrente e tensão), energia, e coeficiente R^2 . Para os três parâmetros avaliados, os resultados do MEP foram melhores que os dos outros dois modelos, na grande maioria dos casos.

O MEP e os modelos Convencional e IEEE foram avaliados em estudos sistêmicos reais de 500 kV de uma concessionária de energia, com sobretensões de manobra (Energização de LT e Rejeição de Carga) e com sobretensões atmosféricas. Os resultados dos estudos com o MEP e o modelo Convencional foram condizentes com o esperado para cada evento. Não foram constatadas oscilações numéricas ou instabilidade nas simulações utilizando o MEP.

Por reunir todas as características descritas acima, conclui-se que o MEP representa o comportamento médio da característica elétrica do supressor de surto de ZnO em uma ampla faixa de operação, sem restrição de uso em regiões de operação, com um baixo valor de erro, necessitando de poucos dados para sua aplicação, comumente divulgados nos *datasheets* dos fabricantes.

Adicionalmente ao desenvolvimento do modelo, foram realizados ensaios elétricos investigatórios, tais como a avaliação dos níveis de tensões induzidas; aplicação do método da compensação indutiva e avaliação da influência do invólucro do supressor de surto na medição da tensão residual. A partir dos resultados desses ensaios abrem-se novos caminhos para melhorias na representação do supressor de surto de ZnO em *softwares* computacionais.

8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos propõe-se:

- Ajustar o MEP para que ele represente o efeito dinâmico do supressor de surto de ZnO, sem a necessidade do conhecimento prévio da forma de onda do impulso de corrente.
- Aplicar métodos de otimização aos parâmetros do MEP, com objetivo de diminuir ainda mais os valores de erros obtidos neste trabalho. Para que os parâmetros do modelo sejam otimizados para uma ampla faixa de operação, faz-se necessário uma abordagem multi-objetiva. A leitura dos trabalhos de Christodoulou et al. (2011) e Zeinoddini-Meymand et al. (2013) são indicadas para o início da pesquisa.
- Desenvolver um equipamento para medição da tensão residual em supressores de surto de ZnO, que possua o efeito do acoplamento indutivo minimizado. Dessa forma, seria possível medir diretamente a tensão residual relacionada à característica $V-I$ do supressor de surto, sem a necessidade de aplicar um método de compensação. A leitura dos trabalhos de Metwally (2010, 2011) são indicadas para o início das atividades.
- Ajustar o MEP para que ele represente o supressor de surto em diferentes estágios de degradação. Para isso, faz-se necessário envelhecer varistores de ZnO prematuramente, como por exemplo, aplicando sequências de impulsos de corrente com elevados valores de amplitude, ou realizando ensaios normatizados de envelhecimento acelerado. Em seguida, deve-se caracterizar a curva $V-I$ em laboratório e classificar os varistores por estágios de degradação, de acordo com o deslocamento da curva $V-I$ em relação à curva do varistor novo. Na sequência, é sugerido associar cada estágio ao tempo de vida útil do varistor. Dessa forma, o MEP irá possuir mais um parâmetro, tempo do supressor de surto em serviço.

Referências

ABB. *Technical Information - TOV Capability and Protective Characteristics for Surge Arresters Type EXLIM and PEXLIM*. Ludvika, Sweden, 2004.

_____. *Overvoltage Protection Metal Oxide Surge Arresters in Medium Voltage Systems*. Wetztingen, Switzerland, 2011.

_____. *High Voltage Surge Arresters – Buyer’s Guide*. Ludvika, Sweden, 2014.

ABDUL MALEK, Z. B. *Development of a Non-Inductive High Voltage D-Dot Probe Voltage Transducer System*. University Technology Malaysia, 2003.

ALVARADO, F. L.; LASSETER, R. H.; SANCHEZ, J. J. Testing of trapezoidal integration with damping for the solution of power transient problems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. 12, p. 3783–3790, December 1983.

BABAEE, A.; EBRAHIMI, R.; HOSEYNPOOR, M.; NAJAFI, M. Investigating different ZnO arresters models against transient waves. *Research Journal Applied Science Engineering Technology*, p. 1421–1429, December 2011.

BARBOSA, F. B. *Técnicas de Diagnóstico e Correlação com Fenômenos de Degradação em Varistores ZnO*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março 2007.

BAYADI, A.; HARID, N.; ZEHAR, K.; BELKHIAT, S. Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behavior under fast transients. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. New Orleans, USA, 2003.

BEZERRA, G. V. N.; NÓBREGA, L. A. M. M.; SILVA JÚNIOR, J. F.; LIRA, G. R. S.; BRITO, V. S.; COSTA, E. G.; MAIA, M. J. A. Evaluation of Surge Arrester Models for Overvoltage Studies. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION. Poznan, Poland, 2014.

BRITO, V.; LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G. Methodology for decomposition of the leakage current in metal oxide surge arrester. In: PROCEEDINGS OF THE 19TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Seoul, Korea, 2013.

BRITO, V. S. *Modelo Adaptativo de Para-Raios de Óxido de Zinco para a Região de Baixa Corrente*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Março 2013.

- CARLSON, W. G.; GUPTA, T. K.; SWEETANA, A. A procedure for estimating the lifetime of gapless metal oxide surge arresters for ac application. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 1, n. 2, p. 67–74, April 1986.
- CHRISTODOULOU, C.; GONOS, I.; STATHOPULOS, I. Estimation of the parameters of metal oxide gapless surge arrester equivalent circuit models using genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 10, p. 1881–1886, October 2011.
- COSTA, E. G. *Análise do Desempenho de Para-raios de Óxido de Zinco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Abril 1999.
- DANG, C.; PARNELL, T. M.; PRICE, P. J. The response of metal oxide surge arresters to steep fronted current impulses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 1, n. 1, p. 157–163, January 1986.
- DRILLING, C.; DROLDNER, M.; JORDAN, E. G.; MEPPPELINK, J. *A device for Correct Measurement of the Residual Voltage of Low Voltage Surge Arresters and Spark Gaps During the Application of High Rate of Rise Current Impulses*. Menden, Germany, 1998.
- FERNANDEZ, F.; DIAZ, R. Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TRANSIENTS. Rio de Janeiro, Brazil, 2001.
- FERNANDO, S. N.; RAGHUVVEER, M. R. Technique to examine the influence of voltage harmonics on leakage current based MOSA diagnostic indicator. In: IEEE. *2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Victoria, Canada, 2000. v. 2, p. 596–599.
- FRANCO, J. *Estudo das Propriedades Elétricas dos Varistores de ZnO na Região de Baixas Tensões Aplicadas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Maio 1993.
- GUPTA, T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 73, n. 7, p. 1817–1840, July 1990.
- HADDAD, A.; FUENTES-ROSADO, J.; GERMAN, D. M.; WATERS, R. T. Characterisation of ZnO surge arrester elements with direct and power frequency voltages. *IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education)*, v. 137, n. 5, p. 269–279, September 1990.
- HADDAD, A.; NAYLOR, P. Dynamic impulse conduction in ZnO arresters. In: IET. *Proceedings of the 11Th International Symposium on High Voltage Engineering, (Conf. Publ. No. 467)*. London, UK, 1999. v. 2, p. 254–257.
- HADDAD, A.; NAYLOR, P.; GERMAN, D. M.; WATERS, R. T. A fast transient test module for ZnO surge arresters. *Measurement Science and Technology*, v. 6, n. 5, p. 560, 1995.
- HADDAD, A.; WARNE, D. *Advances in High Voltage Engineering*. New York, USA: Institution of Engineering and Technology, 2004.

- HAGIWARA, T.; FUNABASHI, T.; WATANABE, H.; TAKEUCHI, N.; UEDA, T. A metal-oxide surge arrester model with active v-i characteristics. *Electrical engineering in Japan*, v. 121, n. 1, p. 35–42, October 1997.
- HARNDEN, J. D.; MARTZLOFF, F. D.; MORRIS, W. G.; GOLDEN, F. B. Metal-oxide varistor: A new way to suppress transients. *Electronics*, v. 2, October 1972.
- HILEMAN, A. R.; ROGUIN, J.; WECK, K. H. Metal-oxide surge arresters in ac systems—part v: protection performance of metal oxide surge arresters. *Electra*, v. 133, p. 132–144, 1990.
- HINRICHSEN, V. *Metal-Oxide Surge Arresters in High Voltage Power Systems - Fundamentals*. Berlin and Darmstadt, Germany, 2011.
- HORIUCHI, S.; ICHIKAWA, F.; MIZUKOSHI, A.; KURITA, K.; SHIRAKAWA, S. Power dissipation characteristics of zinc-oxide arresters for HVDC systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 4, p. 1666–1671, October 1988.
- IEC 60071-1. *Insulation Co-ordination - Part 1: Definitions, Principles and Rules*. [S.l.], 2006.
- IEC 60099-1. *Surge Arresters—Part 1: Non-Linear Resistor Type Gapped Surge Arresters for A.C. Systems*. [S.l.], 1999.
- IEC 60099-4. *Surge Arresters—Part 4: Metal-Oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems*. [S.l.], 2004.
- _____. *Surge Arresters—Part 4: Metal-Oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems*. [S.l.], 2014.
- IEC 60099-5. *Surge Arresters—Part 4: Selection and Application Recommendations*. [S.l.], 2000.
- IEEE C62.11. *Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)*. [S.l.], 2012.
- IEEE C62.22. *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*. [S.l.], 2009.
- IEEE Working Group 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 1, p. 302–309, January 1992.
- KIM, I.; FUNABASHI, T.; SASAKI, H.; HAGIWARA, T.; KOBAYASHI, M. Study of ZnO arrester model for steep front wave. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 834–841, April 1996.
- Leuven EMTP Center. ATP-alternative transients program: rule book. *Heverlee, Belgium*, July 1987.
- LEVINSON, L. M.; PHILIPP, H. R. The physics of metal oxide varistors. *Journal of Applied Physics*, v. 46, n. 3, p. 1332–1341, March 1975.
- _____. High-frequency and high-current studies of metal oxide varistors. *Journal of Applied Physics*, v. 47, n. 7, p. 3116–3121, July 1976.

- LIRA, G. R. S. *Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico de Para-raios de Óxido de Zinco*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Março 2008.
- LIRA, G. R. S.; FERNANDES JÚNIOR, D.; COSTA, E. G. Computation of energy absorption and residual voltage in metal oxide surge arrester from digital models and lab tests: a comparative study. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. Lyon, France, 2007.
- LIRA, G. R. S.; FERNANDES JÚNIOR, D.; COSTA, E. G.; MAIA, M. J. A. Behavior of metal oxide surge arresters for fast surges. In: PROCEEDINGS OF THE CIGRE A3 TECHNICAL COLLOQUIUM. Rio de Janeiro, Brazil, 2007.
- LIRA, G. R. S.; NÓBREGA, L. A. M. M.; GOMES, L. V.; COSTA, E. G. Performance evaluation of MOSA models against lightning discharges. In: PROCEEDINGS OF THE 11TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION. Fortaleza, Brazil, 2011.
- LIRA, G. R. S.; NÓBREGA, L. A. M. M.; GOMES, L. V.; COSTA, E. G. da; MAIA, M. J. Avaliação do desempenho de modelos de para-raios a ZnO frente a descargas atmosféricas. In: ANAIS DO IV SBSE – SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. Goiânia, Brasil, 2012.
- LUNDQUIST, J.; STENSTROM, L.; SCHEI, A.; HANSEN, B. New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 4, p. 1811–1822, October 1990.
- MAGRO, M. C.; GIANNETTONI, M.; PINCETI, P. Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 4, p. 1692–1695, October 2004.
- MARDIRA, K. P.; SAHA, T. K. A simplified lightning model for metal oxide surge arrester. In: *Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference*. Melbourne, Australia: Monash University Publishing, 2002. v. 1, p. 1–6.
- METWALLY, I. A. D-dot probe for fast-front high-voltage measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 59, n. 8, p. 2211–2219, August 2010.
- _____. Comparative measurement of surge arrester residual voltages by d-dot probes and dividers. *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 7, p. 1274–1282, July 2011.
- MODRUSAN, M.; VOIGT, G.; KHARE, S.; FREIBERG, E. An Universal Test Equipment for Metal-Oxide Surge Arresters without Gaps for A.C. Systems According IEC-Standard. 1997.
- MOHAJERYAMI, S.; DOOSTAN, M. Including surge arresters in the lightning performance analysis of 132 kV transmission line. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION. Dallas, USA, 2016.

MONTAÑÉS, L.; GARCÍA-GRACIA, M.; SANZ, M.; GARCÍA, M. A. An improvement for the selection of surge arresters based on the evaluation of the failure probability. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 1, p. 123–128, January 2002.

MORAES, H. M. *Verificação de Degradação de Blocos Cerâmicos à Base de Óxido de Zinco Através da Medição de Descargas Parciais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Dezembro 1987.

NIGOL, O. Methods for analyzing the performance of gapless metal oxide surge arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 3, p. 1256–1264, July 1992.

ONS. *Rede de Operação Sistêmica das Regiões Norte/Nordeste*. 2016. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/mapas_rede_operacao/n_ne/DU-CT.NNE.01_r133.pdf>. Acesso em: 20/06/2016.

ORILLE-FERNÁNDEZ, A. L.; RODRÍGUEZ, S. B.; GOTÉS, M. A. G. Optimization of surge arresters location. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 1, p. 145–150, January 2004.

PEREIRA, M. P. *Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. Rio de Janeiro: Furnas, 1985.

_____. Modelagem de Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) em Estudos de Sobretensões de Manobra. *Revista Iberoamericana del ATP*, v. 1, n. 2, 1999.

PHILIPP, H. R.; LEVINSON, L. M. Low-temperature electrical studies on metal-oxide varistors - a clue to conduction mechanisms. *Journal of Applied Physics*, v. 48, n. 4, p. 1621–1627, April 1977.

PINCETI, P.; GIANNETTONI, M. A simplified model for zinc oxide surge arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 2, p. 393–398, April 1999.

SAKSHAUG, E. A brief history of ac surge arresters. *IEEE Power Engineering Review*, v. 11, n. 8, p. 11–13, August 1991.

SCHMIDT, W.; MEPPÉLINK, J.; RICHTER, B.; FESER, K.; KEHL, L. E.; QUI, D. Behaviour of MO - surge arrester blocks to fast transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 292–300, January 1989.

SHARIATINASAB, R.; VAHIDI, B.; HOSSEINIAN, S. H.; AMETANI, A. Probabilistic evaluation of optimal location of surge arresters on EHV and UHV networks due to switching and lightning surges. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 4, p. 1903–1911, October 2009.

SILVEIRA, J. *Modelagem e Análise de Varistores de Óxido Metálico de Zinco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Maio 2009.

TERRELL, G. R. *Mathematical Statistics: A Unified Introduction*. Blacksburg, USA: Springer, 1999.

THE MATHWORKS, INC. *Curve Fitting Toolbox User's Guide*. Natick, USA, 2012.

- TOMINAGA, S.; AZUMI, K.; SHIBUYA, Y.; IMATAKI, M.; FUJIWARA, Y.; NISHIDA, S. Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic $v-i$ characteristics. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-98, n. 6, p. 1860–1871, November/December 1979.
- TRIRUTTANAPIRUK, N.; YURTHAGOWITH, P. A simple surge arrester model extracted from experimental results. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION. Shangai, China, 2014.
- UNAHALEKHAKA, P. Simplified modeling of metal oxide surge arresters. *Energy Procedia*, v. 56, p. 92–101, 2014.
- VALSALAL, P.; USA, S.; UDAYAKUMAR, K. Modelling of metal oxide arrester for very fast transients. *IET Science, Measurement & Technology*, v. 5, n. 4, p. 140–146, July 2011.
- VILAR, P. B. *Modelagem Matemática de Varistores de ZnO*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Março 2013.
- VILAR, P. B.; LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; MAIA, M. J. A. Development of a mathematical model to ZnO surge arrester. In: PROCEEDINGS OF THE 19TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Seoul, Korea, 2013.
- WANG, Y.; LU, F.; LI, H. Influence of power system's harmonic voltage on on-line leakage current monitoring of MOA. In: IEEE. *Proceedings of the International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications*. Beijing, China, 2004. p. 268–271.
- XIN, L.; JING, W.; JIANYUAN, X. High frequency model of metal-oxide surge arrester for researching on VFTO. In: IEEE. *Proceedings of the 1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology*. Xi'an Shi, China, 2011. p. 577–581.
- ZEINODDINI-MEYMAND, H.; VAHIDI, B.; NAGHIZADEH, R. A.; MOGHIMI-HAJI, M. Optimal surge arrester parameter estimation using a pso-based multiobjective approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1758–1769, July 2013.
- ZHAO, T.; LI, Q.; QIAN, J. Investigation on digital algorithm for on-line monitoring and diagnostics of metal oxide surge arrester based on an accurate model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 751–756, April 2005.
- ZHU, H.; RAGHUVVEER, M. Influence of harmonics in system voltage on metal oxide surge arrester diagnostics. In: IEEE. *1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Austin, USA, 1999. v. 2, p. 542–545.
- ZITNIK, B.; BABUDER, M.; MUHR, M.; ZITNIK, M.; THOTTAPPILLIL, R. Numerical modelling of metal oxide varistors. In: PROCEEDINGS OF THE 15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Beijing, China, 2005.