

---

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

Dissertação de Mestrado

Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico  
de Pára-Raios de Óxido de Zinco

George Rossany Soares de Lira

---

Campina Grande - Paraíba - Brasil

© George Rossany Soares de Lira, Março de 2008

George Rossany Soares de Lira

**Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico  
de Pára-Raios de Óxido de Zinco**

*Dissertação de mestrado 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 Mestre em Ciências  
no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Edson Guedes da Costa, D.Sc.

Orientador

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Março de 2008

**DIGITALIZAÇÃO:**  
**SISTEMOTECA - UFCG**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

L768e

Lira, George Rossany Soares

Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico de Pára-Raios de Óxido de Zinco / George Rossany Soares Lira. - Campina Grande, 2008.  
71 f. : il.

Referências.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Orientadores: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.


1. Estimação de Parâmetros. 2. Modelos de Pára-raios. 3. Pára-raios de Óxido de Zinco. 4. Transitórios Eletromagnéticos. I. Título.

CDU - 621.3.015.3(043)


**ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PARA UM MODELO DINÂMICO DE PÁRA-  
RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO**

**GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA**


Dissertação Aprovada em 14.03.2008



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Orientador



**DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG**  
Orientador



**SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFCG**  
Componente da Banca



**WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
MARÇO-2008

À minha família.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as graças alcançadas. Sem Ele não teria conseguido iniciar este trabalho, muito menos finalizá-lo.

Agradeço aos meus pais Raimundo e Fátima, pelo amor, compreensão, educação e dedicação na formação do meu caráter.

A minha esposa Cristiane e a nossa princesa Clarice, pelo amor, incentivo, paciência e por todos os momentos felizes compartilhados.

Aos meus irmãos Jorge, Giuseppe e Gislando por serem grandes amigos, companheiros e conselheiros.

As minhas tias Socorro, Francisca e Marta por terem ajudado, sempre com amor e carinho, na minha criação e no meu desenvolvimento pessoal. A meu primo Fábio pela amizade e companheirismo. E a todos os meus parentes que de uma forma ou de outra contribuíram para minha formação pessoal.

Aos professores Edson Guedes e Damásio Fernandes, pela amizade, confiança, orientação e incentivo.

Aos amigos Max, Kleber, Marcos, Dennis, Petrus, Karcus, Flávio, Francelino, Robson, Ítalo, José Antônio, Georgeton, Márcio, Alessandro, Everton, Tarso, Rodrigo, pelo companheirismo, amizade e contribuições na minha vida acadêmica e profissional.

Aos funcionários do Laboratório de Alta Tensão, Chico e Eduardo, pelo apoio técnico às montagens dos experimentos.

Ao CNPq pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

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

*George Rossany Soares de Lira*

"Chegar ao destino exige determinação,  
firmeza, sobriedade e fé."

*Clemente*

# Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Abreviaturas	xiii
Resumo	xiv
Abstract	xv
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Organização do Trabalho . . . . .	2
<b>2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1 Pára-Raios de Óxido de Zinco . . . . .	4
2.1.1 Curva Característica dos Pára-Raios de ZnO . . . . .	5
2.1.2 Característica Dinâmica dos Pára-Raios de ZnO . . . . .	7
2.1.3 Modelos de Pára-Raios de ZnO . . . . .	7
2.1.3.1 Modelo Convencional ou Modelo do Resistor Não-linear . . . . .	8
2.1.3.2 Modelo Dinâmico Proposto pelo IEEE . . . . .	9
2.1.3.3 Modelo Proposto por Kim <i>et al.</i> (1996) . . . . .	11
2.1.3.4 Modelo Proposto por Pinceti & Giannettoni (1999) . . . . .	11
2.1.3.5 Modelo Proposto por Fernandez & Diaz (2001) . . . . .	13
2.1.4 Estimação Paramétrica de Modelos de Pára-Raios de ZnO . . . . .	14



---

<b>3</b>	<b>Metodologia Proposta</b>	<b>15</b>
3.1	Modelo Avaliado . . . . .	15
3.1.1	Solução Numérica do Modelo Avaliado . . . . .	16
3.2	Estimação dos Parâmetros do Modelo . . . . .	21
3.3	Método de Otimização Implementado . . . . .	22
3.3.1	Método de Levenberg-Marquardt . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Medições em Laboratório</b>	<b>28</b>
4.1	Varistores de ZnO . . . . .	29
4.2	Ensaio de Tensão Residual . . . . .	30
4.2.1	Geração de Impulso de Corrente . . . . .	31
4.3	Ensaio de Aplicação de Tensão na Frequência Industrial . . . . .	34
4.4	Características $V-I$ dos Varistores de ZnO . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Resultados e Análises</b>	<b>38</b>
5.1	Estimação dos Parâmetros do Modelo do IEEE . . . . .	38
5.2	Testes com Impulsos de Alta Corrente . . . . .	43
5.3	Comparações com Procedimentos Comumente Empregados no Ajuste de Modelos . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>50</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>53</b>

# Lista de Figuras

2.1	Curva característica de um pára-raios a ZnO de 475 kV (HINRICHSEN, 2001).	6
2.2	Curvas características dos resistores não-lineares $A_0$ e $A_1$ (IEEE W. G. 3.4.11, 1992).	9
2.3	Modelo dinâmico proposto pelo IEEE.	10
2.4	Modelo proposto por Kim <i>et al.</i> (1996).	11
2.5	Modelo proposto por Pinceti & Giannettoni (1999).	12
2.6	Modelo proposto por Fernandez & Diaz (2001).	13
3.1	Aplicação de impulso de corrente ao modelo do IEEE.	16
3.2	Circuito discreto equivalente para o modelo do IEEE.	17
3.3	Aproximação linear por partes de uma resistência não-linear.	18
3.4	Circuito discreto equivalente para o modelo do IEEE com resistências não-lineares linearizadas.	19
4.1	Fotografia dos tipos de varistores de ZnO ensaiados.	30
4.2	Impulso de corrente típico.	31
4.3	Fotografias: (a) Gerador de impulso de corrente; (b) Mesa de controle.	32
4.4	Esquema do arranjo experimental utilizado no ensaio de tensão residual.	33
4.5	Fotografias: (a) Kit de Alta Tensão; (b) Mesa de controle e sistema de aquisição de dados.	35
4.6	Esquema do arranjo experimental utilizado no ensaio de tensão na frequência industrial.	35
5.1	Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente $8/20 \mu\text{s}$ aplicado ao varistor 1 do Tipo 1.	40

---

5.2	Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente $8/20 \mu s$ aplicado ao varistor 2 do Tipo 1. . . . .	41
5.3	Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente $8/20 \mu s$ aplicado ao varistor 1 do Tipo 2. . . . .	41
5.4	Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente $8/20 \mu s$ aplicado ao varistor 2 do Tipo 2. . . . .	42
5.5	Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente $8/20 \mu s$ aplicado ao varistor 1 do Tipo 3. . . . .	42
5.6	Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente $8/20 \mu s$ aplicado ao varistor 2 do Tipo 3. . . . .	43
5.7	Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente $4/10 \mu s$ aplicado ao varistor 1 do Tipo 1. . . . .	44
5.8	Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente $4/10 \mu s$ aplicado ao varistor 2 do Tipo 1. . . . .	44
5.9	Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente $4/10 \mu s$ aplicado ao varistor 1 do Tipo 2. . . . .	45
5.10	Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente $4/10 \mu s$ aplicado ao varistor 2 do Tipo 2. . . . .	45
5.11	Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente $4/10 \mu s$ aplicado ao varistor 1 do Tipo 3. . . . .	46
5.12	Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente $4/10 \mu s$ aplicado ao varistor 2 do Tipo 3. . . . .	46

# Lista de Tabelas

4.1	Dados técnicos dos conjuntos de varistores. . . . .	30
4.2	Parâmetros do gerador de impulso de corrente para um impulso $8/20 \mu s$ . . . . .	33
4.3	Parâmetros do gerador de impulso de corrente para um impulso $4/10 \mu s$ . . . . .	34
4.4	Características $V-I$ para os varistores do tipo 1. . . . .	36
4.5	Características $V-I$ para os varistores do tipo 2. . . . .	37
4.6	Características $V-I$ para os varistores do tipo 3. . . . .	37
5.1	Estimativas iniciais dos parâmetros. . . . .	39
5.2	Resultados obtidos a partir da técnica de estimação de parâmetros. . . . .	40
5.3	Resultados para o modelo do IEEE ajustado quando submetido a impulso de alta corrente. . . . .	47
5.4	Comparações entre modelos quando submetidos a impulsos de corrente atmosféricos. . . . .	48
5.5	Comparações entre modelos quando submetidos a impulsos de alta corrente. . . . .	49

# Lista de Abreviaturas

- ATP - Alternative Transients Program.
- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- DFP - Método de Otimização Quase-Newton de Davidon-Fletcher-Powell.
- EMTP - Electromagnetic Transients Program.
- GSE - Grupo de Sistemas Elétricos.
- IEC - International Electrotechnical Commission.
- IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- LAT - Laboratório de Alta Tensão.
- LM - Método de Otimização de Levenberg-Marquardt.
- SG - Espinterômetro do Gerador de Impulso de Corrente.
- SiC - Carboneto de Silício.
- UFCG - Universidade Federal de Campina Grande.
- ZnO - Óxido de Zinco.

# Resumo

Neste trabalho é apresentada uma técnica de estimação de parâmetros para um modelo dinâmico de pára-raios de óxido de zinco (ZnO). Esta técnica baseia-se no ajuste das formas de onda da tensão residual fornecida pelo modelo de pára-raios de ZnO e aquela medida em laboratório, para um impulso de corrente atmosférico (forma de onda 8/20  $\mu$ s) de 10 kA. Os resultados fornecidos pelo modelo ajustado demonstraram boa concordância com os dados medidos. Avaliou-se também, o comportamento do modelo de pára-raios, com os parâmetros ajustados, diante impulsos de alta corrente (forma de onda 4/10  $\mu$ s), os quais são transitórios mais severos do que aqueles utilizados para estimar os parâmetros do modelo. Os resultados obtidos neste estudo apresentaram boa precisão. Por fim, é apresentado um estudo comparativo dos resultados fornecidos pelo modelo de pára-raios, ajustado através da técnica de estimação de parâmetros, com aqueles fornecidos por modelos e procedimentos de ajuste comumente empregados na literatura. Os resultados fornecidos pela técnica de estimação proposta foram mais precisos que todos os demais, além de apresentar as vantagens de dispensar o conhecimento das características físicas dos pára-raios de ZnO e o uso de procedimentos manuais que visam o ajuste dos parâmetros do modelo através de tentativas e erros.

**Palavras-Chaves:** Estimação de parâmetros; Modelos de pára-raios; Pára-raios de óxido de zinco; Transitórios eletromagnéticos; ATP-EMTP.

# Abstract

In this work is shown a parameter identification technique for a dynamic metal-oxide surge arrester model. This technique was based on the fitting of the residual voltages measured and obtained from the surge arrester model, from the 10 kA lightning current impulse (waveshape 8/20  $\mu$ s). The results obtained from the fitted surge arrester model presented a very good accuracy. It was also evaluated, the behavior of the fitted arrester model under high current impulse (waveshape 4/10  $\mu$ s), which are most severe transients than those used to estimate the arrester model parameters. The results obtained in that study presented good agreement compared to the measured data. At last, it was presented a comparative study of the results provided by the fitted surge arrester model with those provided by models e adjust procedures usually made in the literature. The results provided by the proposed parameter identification technique were more accurate than the results obtained from the other procedures. Besides, the technique has the advantages of no need to know the metal oxide surge arresters physical characteristics and no use manual procedures, based on try and error, to adjust the arrester model parameters.

**Keywords:** Parameter identification; Surge arresters models; Metal oxide surge arresters; Electromagnetic transients; ATP-EMTP.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Os pára-raios de óxido de zinco (ZnO) são equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos contra surtos de diversas origens. Dessa forma, eles contribuem decisivamente para o aumento da confiabilidade, economia e continuidade de operação dos sistemas os quais protege. Devido à importância dos pára-raios para os sistemas elétricos e a necessidade da sua correta representação, vários modelos têm sido propostos com intuito de fornecer ferramentas para estudos de coordenação de isolamento, capacidade de absorção de energia, estimação do tempo de vida útil, localização ótima, diagnóstico, seleção correta de pára-raios, entre outros (ZHAO *et al.*, 2005; LI *et al.*, 2002; MONTAÑÉS *et al.*, 2002; IEEE W. G. 3.4.11, 1992).

Diversos modelos de pára-raios de ZnO podem ser encontrados na literatura. Entre os mais importantes estão aqueles propostos por: Zhao *et al.* (2005), Fernandez & Diaz (2001), Pinceti & Giannettoni (1999), Kim *et al.* (1996), IEEE W. G. 3.4.11 (1992), Hileman *et al.* (1990), Haddad *et al.* (1990), Schmidt *et al.* (1989), LEUVEN EMTP CENTER (1987). Cada um dos modelos de pára-raios existentes na literatura possui um procedimento particular para a determinação dos seus parâmetros elétricos. A maioria desses procedimentos é baseada na experimentação, ou seja, nenhuma formalização matemática é realizada. Alguns modelos fazem uso de equações empíricas associadas à utilização de processos iterativos, para obtenção dos valores finais dos parâmetros. Outros necessitam das características físicas ou elétricas, que normalmente não são informadas pelos fabricantes. Além disso, nem sempre os procedimentos existentes para determinação dos parâmetros dos modelos garantem um ajuste adequado.



Diante do exposto, é possível afirmar que os estudos realizados a partir dos modelos de pára-raios existentes e dos seus procedimentos empíricos de ajuste de parâmetros possuem precisão e confiabilidade questionáveis, uma vez que não há como garantir a eficácia dos resultados obtidos.

No intuito de superar as limitações dos procedimentos de ajuste de parâmetros existentes na literatura, assim como atenuar as dúvidas com relação aos estudos realizados com o uso de modelos dinâmicos de pára-raios de óxido de zinco é proposta, neste trabalho, uma técnica que possibilita a estimação dos parâmetros dos modelos de pára-raios de forma mais precisa e confiável, minimizando imprecisões ou erros na modelagem dos pára-raios, que por conseguinte poderiam trazer prejuízos financeiros às concessionárias de energia elétrica.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma técnica de estimação de parâmetros para um modelo dinâmico de pára-raios de óxido de zinco, baseada no ajuste das formas de onda da tensão residual fornecida pelo modelo e aquela medida em laboratório, durante a injeção de um impulso de corrente atmosférico de 10 kA em pára-raios de óxido de zinco.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Realizar uma modelagem precisa e confiável, que represente de forma satisfatória o comportamento do pára-raios mediante transitórios rápidos;
- Desenvolver uma técnica que seja mais eficiente e robusta do que as metodologias existentes atualmente;
- Desenvolver uma técnica de forma que ela possa ser facilmente adaptada para vários modelos de pára-raios de óxido de zinco;

## 1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No Capítulo 2, é realizada uma fundamentação teórica sobre pára-raios de ZnO, suas principais características e modelos.

Apresenta-se também nesse capítulo uma revisão bibliográfica concernente ao tema em estudo.

No Capítulo 3 é apresentado o modelo de pára-raios de ZnO avaliado, a solução numérica do mesmo, e por fim a técnica de estimação de parâmetros proposta neste trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados os ensaios de tensão residual e de aplicação de tensão na frequência industrial em um conjunto de varistores de ZnO. A partir destes ensaios é possível utilizar e validar a técnica de estimação proposta, assim como, realizar estudos comparativos que confirmem a eficácia da técnica. Todos os ensaios foram feitos no Laboratório de Alta Tensão da UFCG.

Em seguida, são apresentados no Capítulo 5, os resultados obtidos a partir do emprego da técnica de estimação, assim como, as suas respectivas análises. Em seguida, são feitos estudos comparativos com modelos e procedimentos usualmente empregados em estudos de transitórios rápidos.

Por fim, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões e contribuições deste trabalho, além de propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

Este capítulo é iniciado com uma rápida introdução aos pára-raios de óxido de zinco, abordando principalmente, suas características não-linear e dinâmica. Em seguida, é realizada uma breve revisão bibliográfica dos principais modelos de pára-raios de óxido de zinco utilizados em estudos de transitórios eletromagnéticos. Simultaneamente, são realizados comentários a respeito das vantagens, limitações e dificuldades intrínsecas dos procedimentos e metodologias comumente empregadas no ajuste dos parâmetros de modelos de pára-raios de ZnO.

### 2.1 Pára-Raios de Óxido de Zinco

Os pára-raios de óxido de zinco (ZnO) utilizados como supressores de surtos são equipamentos empregados na proteção dos sistemas elétricos contra sobretensões de origem externa (por exemplo, descargas atmosféricas) ou interna (por exemplo, sobretensões de manobra). Seu papel é limitar o nível de tensão que atingiria equipamentos importantes, tais como os transformadores de potência, evitando que os mesmos sejam submetidos a níveis de tensões inadequadas a sua operação.

Quanto a sua construção, os pára-raios de ZnO apresentam estrutura composta principalmente por elementos varistores, também denominados de elementos não-lineares, discos, blocos ou pastilhas de ZnO. Os blocos são dispostos em forma de uma ou mais colunas. As colunas são envolvidas por um invólucro de porcelana de forma cilíndrica com aletas ou são moldadas em material polimérico, com formato semelhante ao da porcelana (COSTA, 1999; LIRA *et al.*, 2005a; LIRA *et al.*, 2005b).

Devido a sua eficiência, os pára-raios de ZnO vêm, rapidamente, substituindo os pára-raios de carboneto de silício (SiC) com centelhadores (amplamente utilizados no passado). A seguir, são apresentadas as principais vantagens dos pára-raios de ZnO em relação aos de SiC (COSTA, 1999; HILEMAN, 1999):

- Não-linearidade - A curva  $V-I$  dos pára-raios de ZnO é extremamente não-linear, apresentando uma impedância alta para níveis normais de tensão e uma baixa impedância na presença de sobretensões. Desta forma, eles exercem pouca influência no sistema, quando em regime permanente, e atuam de maneira rápida e eficiente na ocorrência de surtos;
- Confiabilidade - A eliminação dos centelhadores-série simplificou a montagem dos pára-raios, eliminando muitas peças, algumas das quais poderiam causar o seu mau funcionamento;
- Capacidade de absorção de energia - Os varistores de óxido de zinco possuem densidade bastante elevada,  $5450 \text{ kg/m}^3$  e alto calor específico  $5443 \text{ J/cm}^3$ , na temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . Estas características proporcionam aos pára-raios de óxido de zinco o dobro da capacidade de absorção de energia de um pára-raios de SiC.

### 2.1.1 Curva Característica dos Pára-Raios de ZnO

A principal característica do pára-raios de ZnO é a sua não-linearidade em relação a curva  $V-I$ . Esta característica representou um avanço em relação aos pára-raios 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 pára-raios de ZnO pode ser vista na Figura 2.1, na qual são nominados os seus principais pontos e regiões. Na primeira região do gráfico, tem-se a região de baixa corrente, na qual o pára-raios opera em regime permanente. A curva característica, nesta região, apresenta-se como uma função de comportamento aproximadamente linear, conforme descrito por Philipp & Levinson (1977).

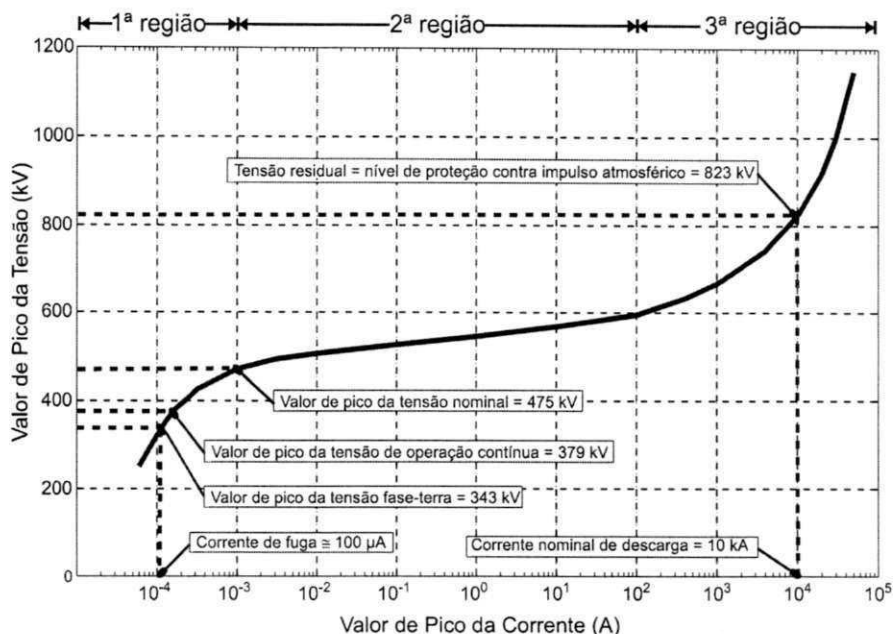


Figura 2.1 – Curva característica de um pára-raios a ZnO de 475 kV (HINRICHSEN, 2001).

O primeiro ponto em destaque representa a corrente de fuga. Como o pára-raios 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, quando o pára-raios está submetido a uma tensão. A corrente de fuga é constituída de uma componente capacitiva e uma pequena corrente resistiva, da ordem de  $100 \mu\text{A}$ , enquanto que a corrente de fuga total pode apresentar um pico da ordem de miliampères (HINRICHSEN, 2001). Sendo assim, nessa região os pára-raios de ZnO apresentam um comportamento capacitivo (LIRA *et al.*, 2007b; ZHAO *et al.*, 2005).

Na primeira região tem-se ainda o ponto da tensão de operação contínua (IEC, 2001) ou da máxima tensão de operação contínua (IEEE W. G. 3.4.14, 2005) a qual corresponde a máxima tensão *rms*, na frequência industrial, que pode ser continuamente aplicada aos terminais do pára-raios.

A próxima região do gráfico é a de alta não-linearidade, onde o pára-raios conduz uma corrente elevada, mesmo para pequenas variações de tensão. O primeiro ponto de interesse é o valor da tensão nominal. Apesar do que o nome possa sugerir, a tensão nominal do pára-raios 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 durante o ensaio de ciclo de operação) sem causar danos aos pára-raios

(IEC, 2001). Dessa forma, consegue-se avaliar a capacidade do pára-raios de lidar com sobretensões temporárias (HINRICHSEN, 2001). O valor da tensão nominal corresponde geralmente a 1,25 vezes o valor da máxima tensão de operação contínua. É nessa região que, normalmente, o pára-raios opera diante sobretensões lentas.

A terceira região é a de alta corrente, a qual está diretamente relacionada ao nível de proteção oferecido pelo pára-raios. É uma região de condução aproximadamente linear e o seu principal ponto é o nível de proteção contra impulsos atmosféricos, correspondendo a tensão (tensão residual) nos terminais do pára-raios para uma descarga de corrente nominal (impulso de corrente atmosférico com amplitude de 10 kA) (IEC, 2001). Nessa região, o pára-raios tem um comportamento dinâmico, como será visto na próxima subseção.

### 2.1.2 Característica Dinâmica dos Pára-Raios de ZnO

Experimentos realizados em laboratório indicaram que os pára-raios de óxido de zinco apresentam, além de sua característica altamente não-linear, uma característica dinâmica. Ela é observada durante a aplicação de impulsos de corrente atmosféricos ou outros surtos com frentes de onda rápidas. Esta característica dinâmica refere-se ao fato de que a tensão sobre o pára-raios de ZnO aumenta com a diminuição do tempo de crista da corrente que o percorre, e que, o pico da tensão ocorre antes do pico da corrente (MARTINEZ; DURBAK, 2005; IEEE W. G. 3.4.14, 1998; IEEE W. G. 3.4.11, 1992). Medições mostram que a tensão de descarga do pára-raios para uma dada amplitude de corrente de descarga aumenta de 6% a 12% à medida que o tempo de crista da corrente diminui de 8  $\mu$ s para 1,3  $\mu$ s (IEEE W. G. 3.4.11, 1992). A característica dinâmica está diretamente relacionada com o mecanismo de condução dos varistores de ZnO, o qual ainda é objeto de investigação pelos pesquisadores da área de ciências dos materiais (EDA, 1989).

### 2.1.3 Modelos de Pára-Raios de ZnO

Atualmente não existe um modelo de pára-raios de ZnO que o represente em toda sua faixa de operação. O que existe, de fato, são modelos para cada região de operação (regiões da curva característica  $V-I$ ) do pára-raios. Dessa forma, os modelos podem ser agrupados em três categorias básicas:

- Modelos para tensão de operação e sobretensões na frequência industrial. Eles devem contemplar a característica não-linear e o comportamento capacitivo do pára-raios;
- Modelos para transitórios de frente lenta, tais como as sobretensões de manobra. Estes modelos contemplam apenas a alta não-linearidade dos pára-raios, sendo representados, portanto, por uma resistência não-linear;
- Modelos para transitórios rápidos, tais como as sobretensões causadas por descargas atmosféricas, devem representar as características não-linear e dinâmica do pára-raios, o que os torna bem mais complexos.

A seguir, será realizada uma breve descrição dos modelos de pára-raios de óxido de zinco mais utilizados na literatura para estudos de transitórios rápidos (LIRA *et al.*, 2007a; LIRA *et al.*, 2007c; MEISTER; OLIVEIRA, 2005; GOUDARZI; MOHSENI, 2004; BAYADI *et al.*, 2003).

### 2.1.3.1 Modelo Convencional ou Modelo do Resistor Não-linear

A característica  $V-I$  do pára-raios de óxido de zinco pode ser representada por um resistor não-linear composto por vários segmentos, no qual cada segmento pode ser aproximado por retas ou pela seguinte equação (DOMMEL, 1996):

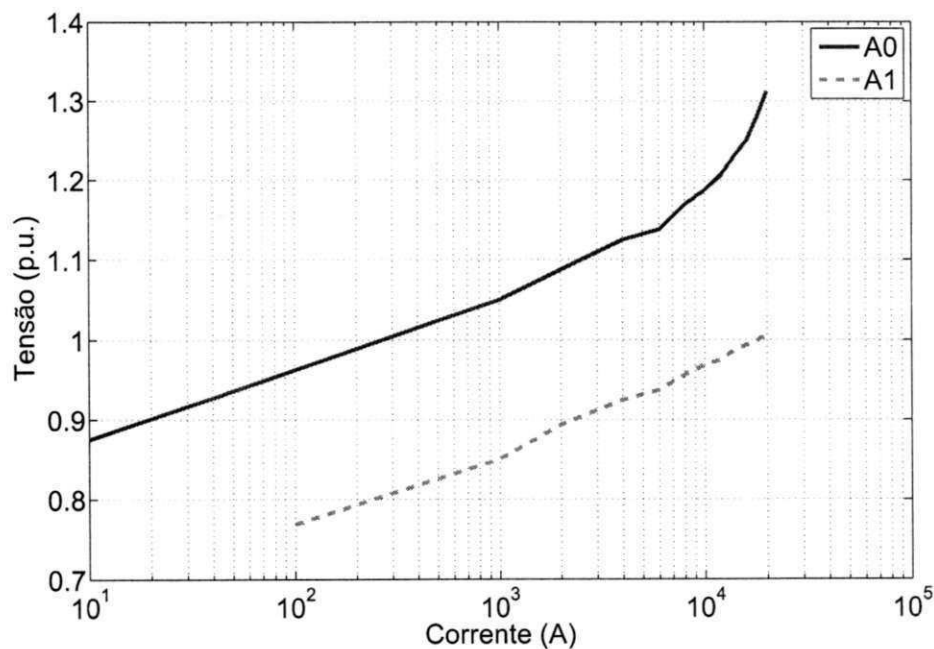
$$i = p \left( \frac{v}{V_{ref}} \right)^q, \quad (2.1)$$

em que,  $q$  é o expoente,  $p$  é o multiplicador para cada segmento e  $V_{ref}$  é uma tensão arbitrária de referência que normaliza a equação e previne problemas de representação numérica (“overflow”) durante a potenciação. Para tensões substancialmente menores que  $V_{ref}$ , a corrente será extremamente pequena, e erros de estouro numérico (“underflow”) poderão ocorrer. Para evitar este tipo de problema e aumentar a velocidade da simulação, o primeiro segmento da curva é aproximado por uma reta (MARTINEZ; DURBAK, 2005). Os demais segmentos são formados a partir dos pontos da curva característica do pára-raios. Uma subrotina do EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) ajusta os pontos da curva característica à Equação (2.1). Este modelo apesar de representar a

característica não-linear do pára-raios de forma satisfatória, não representa a característica dinâmica. Portanto, seu uso em estudos de transitórios rápidos é desaconselhável, devido às imprecisões que o mesmo pode gerar (MARTINEZ; DURBAK, 2005; GOUDARZI; MOHSENI, 2004; BAYADI *et al.*, 2003; LI *et al.*, 2002).

### 2.1.3.2 Modelo Dinâmico Proposto pelo IEEE

No modelo dinâmico proposto pelo IEEE, a característica  $V-I$  não-linear do pára-raios é representada por duas seções de resistências não-lineares designadas por  $A_0$  e  $A_1$ , e definidas através das curvas mostradas na Figura 2.2, onde a tensão de base é a tensão residual do pára-raios. As duas seções são separadas por um filtro  $R-L$ , conforme pode ser visto na Figura 2.3. Para surtos lentos, o filtro  $R-L$  possui uma impedância muito pequena, deixando  $A_0$  e  $A_1$  praticamente em paralelo. Para surtos rápidos, a impedância do filtro  $R-L$  torna-se mais elevada, conseqüentemente a corrente no elemento não-linear  $A_0$  aumenta, assim como a tensão. Dessa forma, representa-se a característica dinâmica do pára-raios (aumento no tempo de frente da corrente implica na elevação da tensão).



**Figura 2.2** – Curvas características dos resistores não-lineares  $A_0$  e  $A_1$  (IEEE W. G. 3.4.11, 1992).



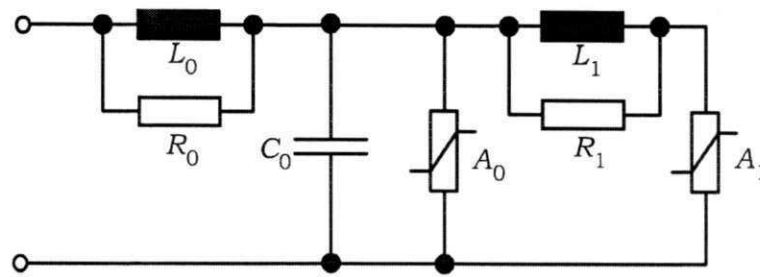


Figura 2.3 – Modelo dinâmico proposto pelo IEEE.

Conforme pode ser observado na Figura 2.3, o modelo possui além das resistências não-lineares  $A_0$  e  $A_1$ , a indutância  $L_0$ , que representa a indutância associada ao campo magnético existente nas vizinhanças do pára-raios. O resistor  $R_0$  serve para evitar problemas numéricos nas simulações digitais. O capacitor  $C_0$  representa a capacitância entre os terminais do pára-raios e os elementos  $R_1$  e  $L_1$  correspondem ao filtro  $R - L$  utilizado para representar a característica dinâmica do pára-raios.

O IEEE W. G. 3.4.11 (1992) afirma que existem algumas dificuldades para a determinação dos parâmetros do modelo. Assim, na tentativa de reduzir tais dificuldades foram sugeridas as fórmulas da Equação (2.2) como estimativas iniciais para os parâmetros.

$$\begin{aligned}
 L_1 &= 15d/n \quad (\mu\text{H}), \\
 R_1 &= 65d/n \quad (\Omega), \\
 L_0 &= 0,2d/n \quad (\mu\text{H}), \\
 R_0 &= 100d/n \quad (\Omega), \\
 C_0 &= 100n/d \quad (\text{pF}),
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

sendo que:

$d$  é altura estimada do pára-raios em metros;

$n$  é o número de colunas paralelas do pára-raios.

Após a obtenção das estimativas iniciais, deve-se partir para o procedimento manual de ajuste de parâmetros baseado em um procedimento de tentativa e erro. Caso o modelo seja bem ajustado é possível utilizá-lo para estudos envolvendo surtos com tempos de frente compreendidos entre  $0,5 \mu\text{s}$  e  $45 \mu\text{s}$ .

### 2.1.3.3 Modelo Proposto por Kim *et al.* (1996)

Kim *et al.* (1996) propuseram um modelo de pára-raios de ZnO baseado em uma indutância não-linear em série com uma resistência não-linear, conforme mostrado na Figura 2.4. De acordo com os autores do modelo, o mesmo fornece bons resultados diante impulsos de corrente rápidos. Entretanto, para impulsos de corrente com tempos de frente maiores que  $4 \mu\text{s}$  não se constata os mesmos bons resultados. Logo, a utilização do modelo está limitada a estudos de transitórios muito rápidos.

No modelo proposto por Kim *et al.* (1996), para a determinação da característica não-linear da indutância é necessário implementar computacionalmente um algoritmo proposto pelos autores do modelo. Enquanto que para determinar a característica não-linear da resistência é preciso conhecer uma quantidade relativamente grande de pontos da característica  $V-I$  do pára-raios, os quais normalmente não são disponibilizados pelos fabricantes.

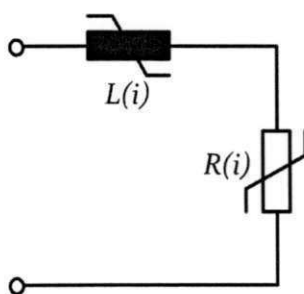
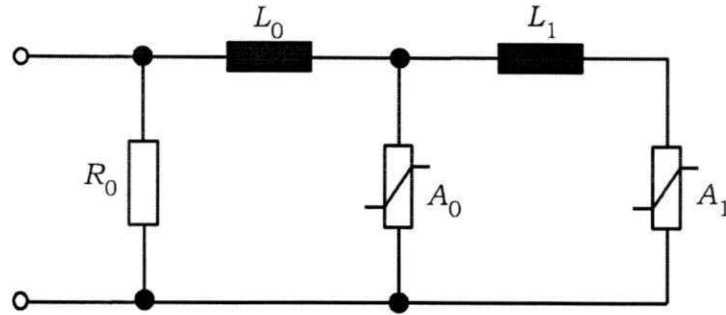


Figura 2.4 – Modelo proposto por Kim *et al.* (1996).

### 2.1.3.4 Modelo Proposto por Pinceti & Giannettoni (1999)

Pinceti & Giannettoni (1999) propuseram simplificações no modelo dinâmico proposto pelo IEEE W. G. 3.4.11 (1992), além de novos procedimentos de ajuste dos parâmetros, de forma a evitar o uso de processos iterativos e dados inexistentes nos catálogos dos fabricantes. O modelo simplificado é mostrado na Figura 2.5.



**Figura 2.5** – Modelo proposto por Pinceti & Giannettoni (1999).

Pode-se notar, a partir da Figura 2.5, que a capacitância existente no modelo do IEEE (Figura 2.3) foi eliminada, pois os autores consideraram que seu efeito no comportamento do modelo é desprezível. As duas resistências em paralelo com os indutores  $L_0$  e  $L_1$  foram substituídas por uma única resistência  $R_0$ , de aproximadamente  $10 \text{ M}\Omega$ , colocada entre os terminais de entrada do modelo que, segundo Pinceti & Giannettoni (1999), serve apenas para evitar oscilações numéricas durante simulações. As resistências  $A_0$  e  $A_1$  são determinadas a partir das curvas mostradas na Figura 2.2. As indutâncias  $L_0$  e  $L_1$  são definidas a partir das Equações (2.3) e (2.4).

$$L_0 = \frac{1}{12} \left( \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \right) V_n \quad (2.3)$$

e

$$L_1 = \frac{1}{4} \left( \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \right) V_n, \quad (2.4)$$

em que:

$V_n$  é a tensão nominal do pára-raios, em kV;

$V_{r1/T2}$  é a tensão residual, em kV, correspondente à aplicação de impulso de corrente rápido de 10 kA (frente de onda em torno de  $1 \mu\text{s}$ );

$V_{r8/20}$  é a tensão residual, em kV, para um impulso de corrente atmosférico (forma de onda  $8/20 \mu\text{s}$ ) de 10 kA.

Apesar de os autores do modelo apresentarem resultados com erros percentuais em torno de 4,5% para o valor de pico da tensão residual, alguns outros trabalhos (BAYADI *et al.*, 2003; LI *et al.*, 2002) mostraram que a forma de onda de tensão produzida pelo modelo

é às vezes bastante discordante da forma de onda de tensão obtida experimentalmente. Em alguns estudos (LIRA *et al.*, 2007a; LIRA *et al.*, 2007c) foram verificadas oscilações numéricas na forma da tensão fornecida pelo modelo. Além do mais, o modelo proposto por Pinceti & Giannettoni (1999) é adequado apenas para surtos com tempos de frente compreendidos entre 1 e 30  $\mu\text{s}$ .

### 2.1.3.5 Modelo Proposto por Fernandez & Diaz (2001)

O modelo proposto por Fernandez & Diaz (2001) é mostrado na Figura 2.6. Como se pode notar, o modelo é mais uma simplificação daquele proposto pelo IEEE (IEEE W. G. 3.4.11, 1992). Assim como no modelo proposto por Pinceti & Giannettoni (1999), as resistências,  $R_0$  e  $R_1$ , em paralelo com as indutâncias  $L_0$  e  $L_1$  foram substituídas por uma resistência,  $R_0$ , em paralelo com o resistor não-linear  $A_0$ . Segundo Fernandez & Diaz (2001), a resistência  $R_0$  tem por finalidade evitar oscilações numéricas. Outro parâmetro desprezado na simplificação foi o indutor  $L_0$ . Da mesma forma, como no modelo proposto pelo IEEE,  $C_0$  representa a capacitância entre os terminais do pára-raios, e  $L_1$  compõe o filtro responsável pela característica dinâmica do modelo.

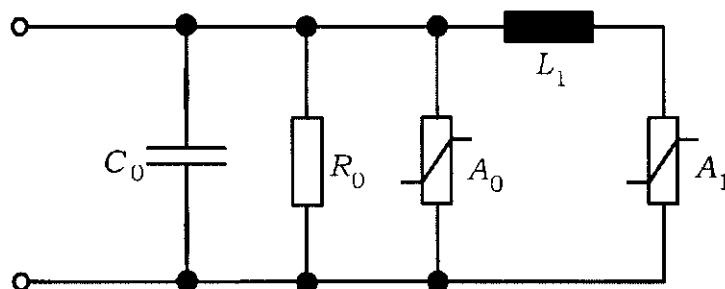


Figura 2.6 – Modelo proposto por Fernandez & Diaz (2001).

O procedimento de ajuste dos parâmetros é relativamente extenso e complexo, dessa forma não será reproduzido aqui. Os resultados fornecidos pelo modelo mostraram boa precisão para descargas de corrente com tempos de frente de onda compreendidos entre 1 e 4  $\mu\text{s}$ . Para correntes de descarga com tempos de frente superiores a 4  $\mu\text{s}$  não é possível determinar os parâmetros do modelo. Segundo Lira *et al.* (2007a) e Lira *et al.* (2007c) este modelo apresentou oscilações numéricas na forma de onda da tensão, assim como, elevada queda de tensão na cauda da forma de onda da tensão residual.

### 2.1.4 Estimação Paramétrica de Modelos de Pára-Raios de ZnO

Muitas dificuldades e incertezas têm sido encontradas no momento de determinar os parâmetros de modelos de pára-raios de ZnO, para estudos de transitórios rápidos em sistemas elétricos. Conforme mostrado na seção anterior, os modelos utilizados nesses estudos fazem uso de procedimentos de ajuste paramétrico empíricos, baseados na tentativa e erro, e que, portanto, não garantem resultados confiáveis e precisos. Diante disso, alguns autores têm concentrado seus esforços no intuito de propor técnicas numéricas ou metodologias que permitam a estimação dos parâmetros dos modelos de forma mais simples e confiável. Até o presente momento, existe apenas um único trabalho publicado concernente ao tema.

Li *et al.* (2002) propuseram uma técnica numérica de estimação paramétrica para modelos de pára-raios de ZnO. Os parâmetros dos modelos foram ajustados a partir dos valores de tensão residual medidos, após a injeção de um impulso de corrente atmosférico em um conjunto de pára-raios. Para realizar a estimação dos parâmetros, Li *et al.* (2002) utilizaram o método de otimização quase-Newton, DFP (Davidon-Fletcher-Powell) (FLETCHER, 1980). Três modelos de pára-raios foram analisados e tiveram seus parâmetros ajustados: modelo proposto por IEEE W. G. 3.4.11 (1992), modelo proposto por Pinceti & Giannettoni (1999) e o modelo proposto por Kim *et al.* (1996). As equações diferenciais dos circuitos foram resolvidas através do método de Runge-Kutta de 4<sup>a</sup> ordem, o qual é um método propenso a instabilidade numérica, caso o passo de integração não seja escolhido de forma satisfatória (HOFFMAN, 2001; DOMMEL, 1996). A maior limitação da técnica é a dificuldade que a mesma apresenta em realizar a estimação de todos os parâmetros dos modelos ao mesmo tempo, sendo necessário fixar alguns parâmetros para tornar possível a estimação dos demais parâmetros. Os melhores resultados foram obtidos quando se utilizou o modelo proposto pelo IEEE em conjunto com a técnica de otimização, mesmo assim, ainda foram obtidos erros em torno de 10%, para o ajuste da forma de onda da tensão no pára-raios.

No próximo capítulo é apresentada uma técnica de estimação de parâmetros que visa suplantiar as limitações encontradas na técnica proposta por Li *et al.* (2002).

# Capítulo 3

## Metodologia Proposta

A técnica de estimação de parâmetros para um modelo de pára-raios de óxido de zinco (ZnO), proposta neste trabalho, realiza o ajuste entre as formas de onda da tensão residual fornecida pelo modelo de pára-raios de ZnO e aquela medida em laboratório, quando o pára-raios é submetido a um impulso de corrente atmosférico de 10 kA.

### 3.1 Modelo Avaliado

Neste trabalho, empregou-se a técnica de estimação de parâmetros ao modelo proposto pelo IEEE (IEEE W. G. 3.4.11, 1992), mostrado na Figura 2.3. A escolha pelo modelo do IEEE deveu-se à precisão, à confiabilidade e à robustez que o mesmo apresenta, segundo pôde-se constatar em alguns estudos (LI *et al.*, 2002; GOUDARZI; MOHSENI, 2004; LIRA *et al.*, 2007a; LIRA *et al.*, 2007b; LIRA *et al.*, 2007c). Além disso, este modelo é recomendado pelo Guia de Aplicação de Pára-raios de Óxido de Zinco em Sistemas de Corrente Alternada (IEEE W. G. 3.4.14, 1998).

Uma vez selecionado o modelo de pára-raios de ZnO a ser avaliado, resta determinar a tensão residual nos terminais do modelo,  $v_1(t)$ , correspondente a injeção de um impulso de corrente atmosférico,  $i(t)$ , conforme mostrado no circuito da Figura 3.1. Para isso, é necessário solucionar o circuito e encontrar uma expressão para  $v_1(t)$  em termos dos parâmetros do circuito ( $R_0, L_0, C_0, R_1, L_1$ ) e da corrente de excitação.

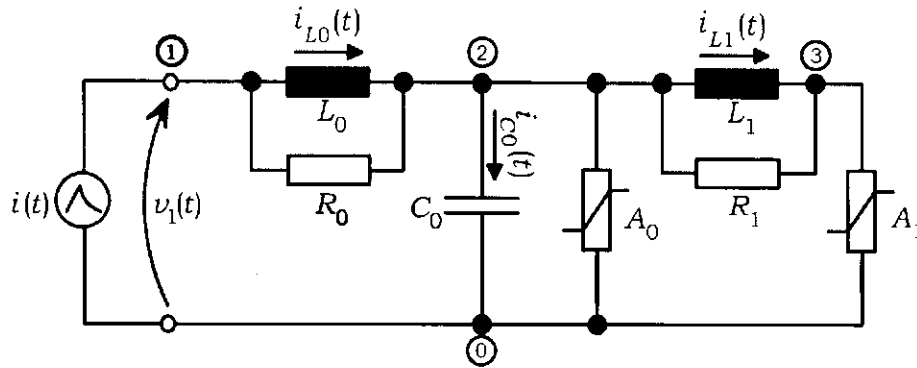


Figura 3.1 – Aplicação de impulso de corrente ao modelo do IEEE.

Neste trabalho adotou-se o método de solução numérica de transitórios eletromagnéticos baseado na discretização das equações diferenciais dos elementos lineares do circuito, utilizando a regra de integração trapezoidal (DOMMEL, 1996; NAIDU, 1985; ZANETTA Jr., 2003; ARAÚJO; NEVES, 2005), e na linearização das resistências não-lineares nas proximidades do ponto de operação. Com isso, pretende-se manter a compatibilidade das soluções aqui encontradas com aquelas fornecidas pelos principais programas existentes para a análise de transitórios eletromagnéticos, como é o caso do ATP - *Alternative Transients Program* (LEUVEN EMTP CENTER, 1987), PSCAD/EMTDC (MANITOBA HVDC RESEARCH CENTRE, INC., 2005), MICROTRAN (MICROTRAN POWER SYSTEM ANALYSIS CORPORATION, 1999), entre outros. Outros métodos de solução numérica podem ser encontrados nos trabalhos de Mamis (2003), Dommel (1996) e Nelms *et al.* (1989). Na próxima seção é apresentado o método de solução empregado no circuito da Figura 3.1.

### 3.1.1 Solução Numérica do Modelo Avaliado

Considerando um passo de integração  $\Delta t$  e aplicando a regra de integração trapezoidal às equações diferenciais dos elementos lineares do circuito da Figura 3.1, obtém-se o circuito equivalente discreto mostrado na Figura 3.2:

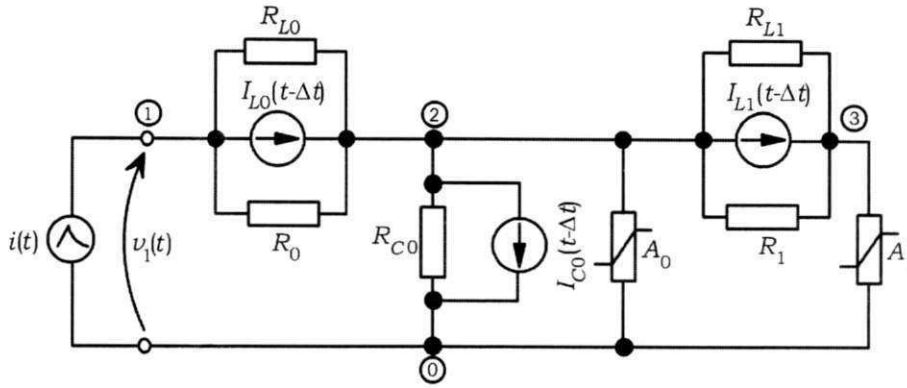


Figura 3.2 – Circuito discreto equivalente para o modelo do IEEE.

Em que as correntes no indutor  $L_0$ , no capacitor  $C_0$  e no indutor  $L_1$  são dados por:

$$i_{L_0}(t) = \frac{v_1(t) - v_2(t)}{R_{L_0}} + I_{L_0}(t - \Delta t), \quad (3.1)$$

$$i_{C_0}(t) = \frac{v_2(t)}{R_{C_0}} + I_{C_0}(t - \Delta t), \quad (3.2)$$

$$i_{L_1}(t) = \frac{v_2(t) - v_3(t)}{R_{L_1}} + I_{L_1}(t - \Delta t), \quad (3.3)$$

As resistências equivalentes e as fontes de corrente “históricas” calculadas no instante de tempo anterior,  $t - \Delta t$ , para os elementos  $L_0$ ,  $C_0$  e  $L_1$ , são obtidas a partir das seguintes equações:

$$R_{L_0} = \frac{2L_0}{\Delta t}, \quad (3.4)$$

$$I_{L_0}(t - \Delta t) = \frac{v_1(t - \Delta t) - v_2(t - \Delta t)}{R_{L_0}} + i_{L_0}(t - \Delta t), \quad (3.5)$$

$$R_{C_0} = \frac{\Delta t}{2C_0}, \quad (3.6)$$

$$I_{C_0}(t - \Delta t) = -\frac{v_2(t - \Delta t)}{R_{C_0}} - i_{C_0}(t - \Delta t), \quad (3.7)$$

$$R_{L_1} = \frac{2L_1}{\Delta t}, \quad (3.8)$$

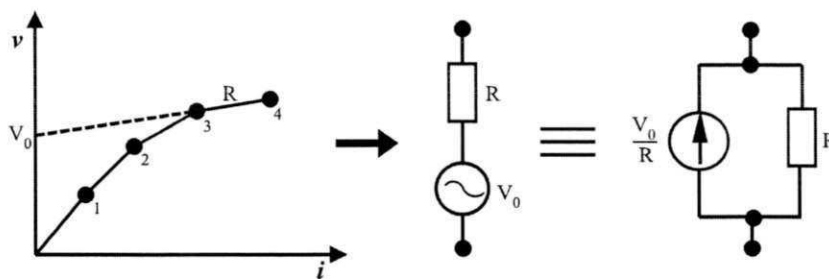
$$I_{L_1}(t - \Delta t) = \frac{v_2(t - \Delta t) - v_3(t - \Delta t)}{R_{L_1}} + i_{L_1}(t - \Delta t). \quad (3.9)$$

Após tratar todos os elementos lineares do modelo do IEEE, resta saber como lidar com as resistências não-lineares  $A_0$  e  $A_1$ . Em estudos de transitórios eletromagnéticos, elementos não-lineares normalmente são tratados através dos métodos da compensação e da aproximação linear por partes (ARAÚJO; NEVES, 2005).



O método da compensação consiste em substituir o elemento não-linear de um circuito por uma fonte de corrente, construir o circuito equivalente de Thévenin, e então resolver numericamente, através de um método iterativo, o sistema de equações formado pelas equações da parte linear do circuito e pela equação que rege o comportamento do elemento não-linear.

Já o método da aproximação linear por partes consiste basicamente, em aproximar a curva característica de uma resistência não-linear por segmentos de retas, em que, cada segmento de reta com inclinação  $R$  é representado por uma fonte de tensão (de valor igual ao coeficiente linear do segmento) em série com uma resistência de valor  $R$ , ou por uma fonte de corrente (equivalente de Norton) em paralelo com uma resistência de valor  $R$ , conforme mostrado na Figura 3.3.



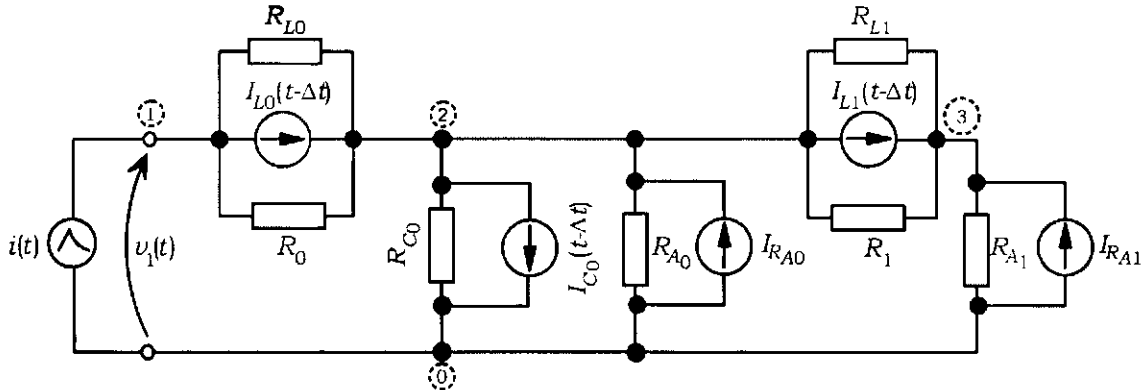
**Figura 3.3** – Aproximação linear por partes de uma resistência não-linear.

Quando se utiliza o método da aproximação linear por partes, ocorrem mudanças de um segmento de reta para outro na curva característica aproximada da resistência não-linear. Essas mudanças provocam “overshoots”, que podem ter seus efeitos minimizados com a escolha adequada do passo de cálculo  $\Delta t$ , uma vez que isso permitirá transições mais suaves entres os segmentos da curva característica aproximada do elemento não-linear.

O método da compensação produz, no geral, resultados mais precisos do que o método da aproximação linear por partes, entretanto, ele requer um maior esforço computacional (ARAÚJO; NEVES, 2005; LEUVEN EMTP CENTER, 1987), além de estar sujeito a instabilidades numéricas (DOMMEL, 1996).

Nesta fase da pesquisa, preferiu-se representar as resistências não-lineares  $A_0$  e  $A_1$  do modelo do IEEE, através do método da aproximação linear por partes, em função da sua facilidade de implementação, do seu menor esforço computacional e dos bons resultados obtidos em termos de precisão.

Aplicando, então, o método da aproximação linear por partes as resistências não-lineares do circuito da Figura 3.2, obtém-se o circuito mostrado na Figura 3.4, em que,  $R_{A_0}$  representa a inclinação (coeficiente angular) de um determinado segmento de reta da curva característica aproximada de  $A_0$ , e  $I_{R_{A_0}}$ , a fonte de corrente de Norton, obtida de acordo com o apresentado na Figura 3.3. Definições análogas são válidas para  $R_{A_1}$  e  $I_{R_{A_1}}$ .



**Figura 3.4** – Circuito discreto equivalente para o modelo do IEEE com resistências não-lineares linearizadas.

A resolução do circuito da Figura 3.4 foi feita utilizando análise nodal. Dessa forma, o sistema de equações algébricas que descreve o estado do sistema em qualquer instante de tempo  $t$  é dado por:

$$\mathbf{G}\mathbf{v}(t) = \mathbf{i}_c(t) + \mathbf{I}_h(t - \Delta t), \quad (3.10)$$

em que:

$\mathbf{v}(t)$  é o vetor das tensões nodais desconhecidas, de dimensão  $(p - 1)$ , onde  $p$  é número de nós principais do circuito (4 no caso do circuito da Figura 3.4);

$\mathbf{G}$  é a matriz  $(p - 1) \times (p - 1)$  de condutância nodal, cujos elementos  $G_{ii}$  são iguais à soma das condutâncias dos ramos incidentes no nó  $i$ . Já os elementos  $G_{ij}$  são iguais ao negativo da condutância equivalente entre os nós  $i$  e  $j$ ;

$\mathbf{i}_c(t)$  é o vetor de dimensão  $(p - 1)$  cujos elementos são iguais a soma algébrica das fontes de correntes conhecidas ligadas ao nó considerado. Atribuiu-se às mesmas o sinal positivo quando entram em um nó e o negativo quando saem;

$\mathbf{I}_h(t - \Delta t)$  é o vetor de dimensão  $(p - 1)$  cujos elementos são iguais a soma algébrica das fontes de correntes como termos “históricos”. Atribuiu-se às mesmas o sinal positivo quando entram em um nó e o negativo quando saem.

A matriz de condutância nodal é real, simétrica e permanece constante até que as resistências  $R_{A_0}$  e  $R_{A_1}$  mudem de valor. As resistências  $R_{A_0}$  e  $R_{A_1}$  irão mudar de valor sempre que houver uma mudança de segmento nas curvas características aproximadas de  $A_0$  e  $A_1$ . Para o circuito analisado, tem-se que  $\mathbf{G}$  é dada por:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_{L_0}} & & -\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{L_0}} & & 0 \\ -\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{L_0}} & \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_{L_0}} + \frac{1}{R_{C_0}} + \frac{1}{R_{A_0}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{L_1}} & & -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_{L_1}} & \\ 0 & & -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_{L_1}} & & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{L_1}} + \frac{1}{R_{A_1}} \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Os vetores das fontes de correntes conhecidas e históricas são dadas pelas Equações (3.12) e (3.13), respectivamente:

$$\mathbf{i}_c(t) = \begin{bmatrix} i(t) \\ I_{R_{A_0}} \\ I_{R_{A_1}} \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{I}_h(t - \Delta t) = \begin{bmatrix} -I_{L_0}(t - \Delta t) \\ I_{L_0}(t - \Delta t) - I_{C_0}(t - \Delta t) - I_{L_1}(t - \Delta t) \\ I_{L_1}(t - \Delta t) \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

O vetor de tensões nodais,  $\mathbf{v}(t)$ , o qual é a incógnita do problema, é dado pela seguinte equação:

$$\mathbf{v}(t) = \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

A seguir são apresentados, de forma resumida, os passos para resolução do circuito do IEEE através da método apresentado:

1. Selecionar um passo de integração e um tempo máximo de simulação;
2. Determinar as resistências equivalentes dos elementos  $L_0$ ,  $C_0$  e  $L_1$  (Equações (3.4), (3.6) e (3.8), respectivamente);

3. Considerar no instante inicial todas as tensões e correntes do circuito nulas;
4. Considerar as resistências  $R_{A_0}$  e  $R_{A_1}$  como sendo iguais às inclinações dos segmentos de retas iniciais das curvas  $V-I$  aproximadas de  $A_0$  e  $A_1$ ;
5. Enquanto o tempo de máximo de simulação não for atingido, deve-se:
  - (a) Determinar a matriz de condutância nodal,  $\mathbf{G}$  (Equação (3.11));
  - (b) Determinar as fontes de corrente conhecidas e históricas (Equações (3.12) e (3.13), respectivamente);
  - (c) Resolver o sistema de equações (3.10) e determinar a tensão  $v_1(t)$  nos terminais de entrada do modelo do IEEE;
  - (d) Determinar através do método da aproximação linear por partes os novos valores das resistências  $R_{A_0}$  e  $R_{A_1}$ , uma vez que são conhecidos os valores das tensões sobre os elementos  $A_0$  e  $A_1$  (tensões  $v_2(t)$  e  $v_3(t)$ );

### 3.2 Estimação dos Parâmetros do Modelo

O problema abordado aqui é tipicamente um problema de mínimos quadrados. Em problemas desse tipo, normalmente se deseja minimizar os erros existentes entre valores calculados e medidos de determinada grandeza do problema em questão. Neste trabalho, pretende-se minimizar os erros entre os valores da tensão residual fornecida pelo modelo do IEEE e aqueles obtidos através de medições, ou seja, pretende-se ajustar a forma de onda da tensão residual fornecida pelo modelo àquela obtida em laboratório. Sendo assim, a função objetivo do problema, isto é, a função que se deseja minimizar, possui a seguinte forma especial:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [r_j(\mathbf{x})]^2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{r}(\mathbf{x})\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{r}(\mathbf{x})^T \mathbf{r}(\mathbf{x}), \quad (3.15)$$

onde a função  $\mathbf{r}(\mathbf{x})$  (sendo  $\mathbf{r}(\mathbf{x})^T$  a transposta de  $\mathbf{r}(\mathbf{x})$ ) é chamada de *resíduo*, à qual é definida da seguinte maneira:

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = \mathbf{v}_m - \mathbf{v}_1, \quad (3.16)$$

em que:

$\mathbf{x}$  é o vetor paramétrico ( $\mathbf{x} = \{R_0, L_0, C_0, R_1, L_1\}$ ) de dimensão  $n$ ;

$m$  é o número de pontos capturados na forma de onda da tensão residual medida;

$\mathbf{v}_m$  é o vetor de dimensão  $m$ , correspondente aos valores medidos da tensão residual;

$\mathbf{v}_1$  é o vetor de dimensão  $m$ , correspondente aos valores calculados da tensão residual, através do método apresentado na seção anterior, para o vetor paramétrico  $\mathbf{x}$ .

Problemas envolvendo mínimos quadrados podem ser solucionados através de vários métodos de otimização. Contudo, existem alguns que são mais eficientes para esse tipo de aplicação, como é o caso do método de Levenberg-Marquardt (NOCEDAL; WRIGHT, 1999; KELLEY, 1999; MADSEN *et al.*, 2004). Este método possui características de convergência global<sup>1</sup> (KELLEY, 1999), tendo apresentado na literatura um bom desempenho em situações práticas, fato que o vem tornando o método padrão em rotinas para resolver problemas de mínimos quadrados não-lineares (PRESS *et al.*, 1992), como o apresentado aqui.

### 3.3 Método de Otimização Implementado

O objetivo do método de otimização implementado, nesta dissertação, é encontrar o vetor paramétrico  $\mathbf{x}$  que minimiza a função objetivo  $f(\mathbf{x})$  (Equação (3.15)). Neste tipo de problema é possível encontrar dois tipos de *minimizadores*: o local e o global. A seguir, são apresentadas as definições dos minimizadores.

**Definição 3.3.1 (Minimizador Local).** Suponha que  $f(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é uma função real definida em um conjunto  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ . Um vetor  $\mathbf{x}^* \in \Omega$  é um minimizador local de  $f(\mathbf{x})$  sobre  $\Omega$  se existe  $\epsilon > 0$  tal que  $f(\mathbf{x}) \geq f(\mathbf{x}^*)$  para todo  $\mathbf{x} \in \Omega$ ,  $\mathbf{x}^* \in \Omega$  e  $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\| < \epsilon$

**Definição 3.3.2 (Minimizador Global).** Um vetor  $\mathbf{x}^* \in \Omega$  é minimizador global de  $f(\mathbf{x})$  sobre  $\Omega$  se  $f(\mathbf{x}) \geq f(\mathbf{x}^*)$  para todo  $\mathbf{x} \in \Omega$  e  $\mathbf{x}^* \in \Omega$ .

<sup>1</sup>Ao contrário de um método de convergência local (o método de Newton, por exemplo), um método de convergência global pode convergir para um minimizador local mesmo para estimativas iniciais distantes de tal minimizador.

Idealmente, deseja-se encontrar o minimizador global de uma função, contudo, esta é uma tarefa bastante árdua. Normalmente, na prática, é suficiente determinar um dos minimizadores locais<sup>2</sup> da função objetivo (CHONG; ZAK, 2001). Dessa forma, deve-se estabelecer condições necessárias e suficientes para que um vetor  $\mathbf{x}$  seja minimizador local de uma determinada função objetivo (condições de otimalidade). A seguir, são apresentados definições e teoremas relacionados às condições de otimalidade.

**Definição 3.3.3.** Uma matriz simétrica  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  é *positiva definida*  $\Leftrightarrow \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{x} \neq 0$ :  $\mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} > 0$ .  $\mathbf{H}$  é *positiva semi-definida*  $\Leftrightarrow \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{x} \neq 0$ :  $\mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} \geq 0$ .

**Teorema 3.3.1 (Condições Necessárias de Primeira e Segunda Ordens).** Seja  $f(\mathbf{x})$  duas vezes continuamente diferenciável e seja  $\mathbf{x}^*$  um minimizador local de  $f(\mathbf{x})$ . Então,  $\nabla f(\mathbf{x}^*) = 0$ , e mais ainda  $\nabla^2 f(\mathbf{x}^*)$  é positiva semi-definida.

**Teorema 3.3.2 (Condição Suficiente de Segunda Ordem).** Seja  $f(\mathbf{x})$  duas vezes continuamente diferenciável nas vizinhanças de  $\mathbf{x}^*$ . Assuma que  $\nabla f(\mathbf{x}^*) = 0$  e que  $\nabla^2 f(\mathbf{x}^*)$  é positiva definida. Então  $\mathbf{x}^*$  é minimizador local de  $f(\mathbf{x})$ .

Após a definição das condições de otimalidade, é apresentado na seção seguinte o método de Levenberg-Marquardt utilizado neste trabalho.

### 3.3.1 Método de Levenberg-Marquardt

O método de Levenberg-Marquardt (LM) é um técnica iterativa, baseada no método de Newton, normalmente utilizada para encontrar o mínimo de uma função multivariável expressa em termos da soma dos quadrados de funções reais não-lineares. Dessa forma, assim como no método de Newton, o método de LM utiliza uma aproximação da função objetivo definida em (3.15) baseada em um modelo quadrático ( $m(\mathbf{d})$ ), o qual é obtido através da expansão em série de Taylor da função  $f(\mathbf{x}_0)$  em torno de  $\mathbf{x}_0$ , onde os termos de ordem maior que dois são desconsiderados. Daí, obtém-se:

$$m(\mathbf{d}) \equiv f(\mathbf{x}_0) + \mathbf{d}^T \nabla f(\mathbf{x}_0) + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \nabla^2 f(\mathbf{x}_0) \mathbf{d}, \quad (3.17)$$

<sup>2</sup>Uma função objetivo pode ter mais de um minimizador local.

onde  $\mathbf{d} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$  é a direção de busca do método de LM,  $\mathbf{x}_0$  é uma estimativa inicial e  $\mathbf{x}$  é o novo vetor paramétrico.

O gradiente ( $\nabla f(\mathbf{x}_0)$ ) e a Hessiana ( $\nabla^2 f(\mathbf{x}_0)$ ) de  $f(\mathbf{x}_0)$  normalmente são expressos em uma forma mais conveniente, em termos da matriz Jacobiana de  $\mathbf{r}(\mathbf{x}_0)$ , a qual é uma matriz  $m \times n$  das derivadas parciais de 1ª ordem, definida por:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_i}{\partial x_j} \end{bmatrix}_{\substack{i=1,2,\dots,m \\ j=1,2,\dots,n}}. \quad (3.18)$$

Sendo assim, tem-se que o gradiente de  $f(\mathbf{x}_0)$  é dado por:

$$\begin{aligned} \nabla f(\mathbf{x}_0) &= \frac{\partial f}{\partial x_j}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^m r_i(\mathbf{x}_0) \frac{\partial r_i}{\partial x_j}(\mathbf{x}_0) \Rightarrow \\ \mathbf{g} &\equiv \nabla f(\mathbf{x}_0) = \mathbf{J}(\mathbf{x}_0)^T \mathbf{r}(\mathbf{x}_0). \end{aligned} \quad (3.19)$$

E a matriz Hessiana (matriz das derivadas parciais de 2ª ordem) de  $f(\mathbf{x}_0)$  é definida da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \nabla^2 f(\mathbf{x}_0) &= \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial r_i}{\partial x_j}(\mathbf{x}_0) \frac{\partial r_i}{\partial x_k}(\mathbf{x}_0) + r_i(\mathbf{x}_0) \frac{\partial^2 r_i}{\partial x_j \partial x_k}(\mathbf{x}_0) \right), \\ \nabla^2 f(\mathbf{x}_0) &= \mathbf{J}(\mathbf{x}_0)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_0) + \sum_{i=1}^m r_i(\mathbf{x}_0) \mathbf{r}_i''(\mathbf{x}_0). \end{aligned} \quad (3.20)$$

O método de Levenberg-Marquardt realiza duas modificações na matriz Hessiana. A primeira delas é considerar que a função resíduo  $\mathbf{r}(\mathbf{x}_0)$  é aproximadamente linear nas vizinhanças de  $\mathbf{x}_0$ . Dessa forma, o segundo termo da matriz Hessiana é desprezado. A segunda modificação é a que realmente caracteriza o método, e consiste na inserção de um termo de amortecimento,  $\mu$ , na aproximação da matriz Hessiana, de forma a garantir que a mesma seja positiva definida, e que a direção de busca do algoritmo seja sempre uma direção descendente. Portanto, a matriz Hessiana com a modificação de Levenberg-Marquardt, torna-se:

$$\mathbf{H} \approx \mathbf{J}(\mathbf{x}_0)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_0) + \mu \mathbf{I}, \quad (3.21)$$

onde  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade e  $\mu$  é uma constante maior que zero.

Sendo assim, pode-se reescrever o modelo quadrático de  $f(\mathbf{x})$  (Equação (3.17)), da seguinte maneira:

$$m(\mathbf{d}) = f(\mathbf{x}_0) + \mathbf{d}^T \mathbf{g} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{H} \mathbf{d}, \quad (3.22)$$

onde  $\mathbf{g}$  e  $\mathbf{H}$  são definidas através das Equações (3.19) e (3.21), respectivamente.

Para encontrar um minimizador local de  $f(\mathbf{x}_0)$  deve-se aplicar as condições de otimalidade ao modelo quadrático,  $m(\mathbf{d})$ , de acordo com o **Teorema 3.3.1**:

$$\begin{aligned}\nabla m(\mathbf{d}) = 0 &\Rightarrow \\ \mathbf{g} + \mathbf{dH} &= 0.\end{aligned}\tag{3.23}$$

Reescrevendo a Equação (3.23), é possível determinar a nova direção de busca do método de LM através da solução do seguinte sistema:

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{d} = -\mathbf{g}.\tag{3.24}$$

Daí, então, obtém-se a fórmula de recorrência responsável pela atualização do vetor paramétrico:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{d}.\tag{3.25}$$

Mesmo com todo este equacionamento, o método de Levenberg-Marquardt ainda não está totalmente completo, pois falta definir a estratégia de atualização do termo de amortecimento  $\mu$ . O termo de amortecimento é de fundamental importância para a robustez do método, já que é este termo que garante que a matriz Hessiana seja positiva definida, e portanto, que o novo valor do vetor paramétrico  $\mathbf{x}$ , encontrado através da Equação (3.25), seja um minimizador local de  $f(\mathbf{x})$ , de acordo com o **Teorema 3.3.2**. Vários autores (FLETCHER, 1980; PRESS *et al.*, 1992; RAO, 1996; KELLEY, 1999; MADSEN *et al.*, 2004) têm apresentado estratégias para atualização do termo de amortecimento  $\mu$ . Após alguns testes, constatou-se que a estratégia mais simples e eficiente (pelo menos para o problema abordado aqui) foi aquela proposta por Rao (1996), a qual consiste basicamente, em atribuir inicialmente, um valor elevado à  $\mu$  fazendo com que o método de Levenberg-Marquardt comporte-se como o método do máximo declive descendente. Em seguida, avalia-se se a direção de busca,  $\mathbf{d}$ , é uma direção descendente ( $f(\mathbf{x}) < f(\mathbf{x}_0)$ ). Em caso afirmativo, diminui-se gradativamente o valor de  $\mu$  fazendo com que o método de LM comporte-se como um método de Newton, cuja convergência é mais rápida. Caso a direção de busca não seja uma direção descendente, torna-se a elevar o valor de  $\mu$ , fazendo



com que o método de LM comporte-se como o do máximo declive descendente, que apesar de ter convergência garantida é mais lento que o método de Newton.

A seguir é apresentado o algoritmo básico, utilizado para determinar o valor de  $\mathbf{x}$  que minimiza  $f(\mathbf{x})$ .

1. Obter uma estimativa inicial do vetor paramétrico,  $\mathbf{x}_0 = \{R_0, L_0, C_0, R_1, L_1\}$ ;
2. Entrar com vetor  $\mathbf{v}_m$  correspondente a tensão residual medida sobre o pára-raios para um impulso de corrente atmosférico;
3. Entrar com o valor da tolerância desejada ( $\varepsilon$ ) e com o número máximo de iterações permitas ( $i_{\max}$ );
4. Fazer  $i = 0$ ,  $\mu = 10^4$ ;
5. Calcular  $\mathbf{v}_1$  a partir do método mostrado na Seção 3.1.1;
6. Calcular  $\mathbf{J}$  e  $\mathbf{H}$  a partir das Equações (3.18) e (3.21), respectivamente;
7. Calcular  $\mathbf{r}(\mathbf{x}_0)$  e  $\mathbf{g}$  a partir das Equações (3.16) e (3.19), respectivamente;
8. Calcular  $f(\mathbf{x}_0)$  de acordo com a Equação (3.15);
9. Enquanto  $i < i_{\max}$ :
  - (a) Calcular a direção de busca  $\mathbf{d}$  e o novo valor do vetor paramétrico  $\mathbf{x}$  através das Equações (3.24) e (3.25), respectivamente;
  - (b) Calcular  $f(\mathbf{x})$ ;
  - (c) Se  $|f(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x}_0)| < \varepsilon$ , finalizar o algoritmo;
  - (d) Caso  $f(\mathbf{x}) < f(\mathbf{x}_0)$ :
    - i. Dividir  $\mu$  por 10;
    - ii. Recalcular  $\mathbf{J}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{r}(\mathbf{x})$  e  $\mathbf{g}$ ;
  - (e) Caso  $f(\mathbf{x}) \geq f(\mathbf{x}_0)$ :
    - i. Multiplicar  $\mu$  por 10;

- ii. Recalcular  $\mathbf{H}$ ;
- (f) Fazer  $f(\mathbf{x}_0) = f(\mathbf{x})$ ;
- (g) Incrementar  $i$ ;
- (h) Voltar ao passo 9.

No próximo capítulo serão apresentados ensaios de tensão residual e de aplicação de tensão na frequência industrial em seis varistores de ZnO. Os dados destes ensaios servirão de base de dados para aplicação e validação da técnica de estimação ora proposta, conforme ficará evidente no Capítulo 5.

## Capítulo 4

# Medições em Laboratório

Este capítulo trata das medições realizadas em laboratório necessárias à utilização e validação da técnica de estimação paramétrica proposta. Inicialmente, são apresentados os varistores de óxido de zinco utilizados nos ensaios, assim como, suas características físicas e elétricas. Em seguida, são descritos os ensaios de tensão residual para impulsos de corrente atmosférico e alta corrente. E por fim, é apresentado o ensaio de aplicação de tensão na frequência industrial.

O ensaio de tensão residual para impulso de corrente atmosférico é um ensaio de tipo, ao qual o pára-raios de óxido de zinco deve ser submetido, para que se possa determinar o seu nível de proteção frente descargas atmosféricas. Os resultados do ensaio são facilmente encontrados nos catálogos de fabricantes. Dessa forma, muitos procedimentos utilizados na determinação de parâmetros de modelos de pára-raios usam as informações oriundas desse ensaio. A técnica de estimação de parâmetros aqui proposta também faz uso das formas de onda de tensão e corrente obtidas a partir de ensaios de tensão residual.

Ensaio com impulso de alta corrente também são apresentados com a finalidade de avaliar o comportamento do pára-raios diante transitórios mais rápidos.

Por fim, são apresentados os ensaios de aplicação de tensão na frequência industrial, os quais são necessários à obtenção das curvas características dos varistores ensaiados. Estas curvas não serão necessárias à utilização da técnica proposta, mas sim para procedimentos de ajustes comumente empregados na literatura, os quais serão objetos de análise neste trabalho.

## 4.1 Varistores de ZnO

Ensaio em pára-raios completos normalmente não são possíveis de serem realizados e quando o são, têm um custo bastante elevado. Por esse motivo, todos os ensaios apresentados neste trabalho foram realizados em varistores (seções de teste) ao invés de pára-raios completos. Isto é possível, pois os pára-raios de ZnO são constituídos essencialmente por varistores de ZnO, os quais são responsáveis por fornecerem as principais características físicas e elétricas dos pára-raios. Além do mais, a norma IEEE W. G. 3.4.14 (2005) determina que a tensão residual em um pára-raios completo é proporcional àquela obtida a partir de uma seção de teste. A constante de proporcionalidade,  $K_s$ , que permite determinar a tensão residual no pára-raios completo é dada pela seguinte equação:

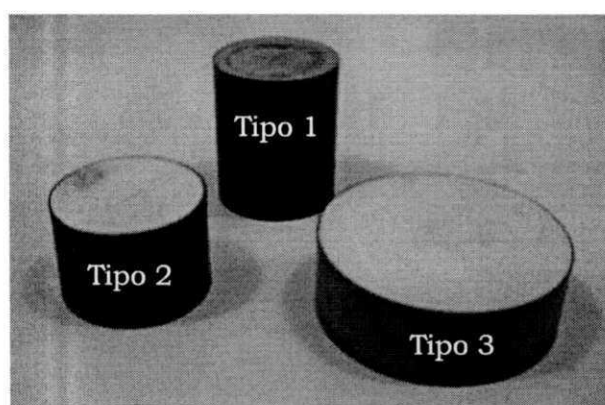
$$K_s = \frac{V_{DA}}{V_{DS}}, \quad (4.1)$$

onde  $V_{DA}$  é a máxima tensão residual de um pára-raios para impulso de corrente de 10 kA e forma de onda 8/20  $\mu$ s e  $V_{DS}$  é a tensão residual medida na seção de teste para um impulso de corrente de 10 kA e forma de onda 8/20  $\mu$ s.

Baseado nessa informação, selecionou-se diversas amostras de varistores de ZnO (seções de teste), as quais foram submetidas a ensaios de tensão residual, com a finalidade de obter os dados necessários à aplicação e validação da técnica de estimação de parâmetros proposta. As amostras foram obtidas através de doações de fabricantes e do desmonte de pára-raios completos, utilizáveis em sistemas de distribuição. Na Tabela 4.1 são apresentadas as principais características físicas e elétricas das seis amostras utilizadas. Na Figura 4.1 é mostrada uma fotografia dos três tipos de varistores utilizados nos ensaios de tensão residual e de aplicação de tensão na frequência industrial.

**Tabela 4.1** – Dados técnicos dos conjuntos de varistores.

Dados técnicos/Varistor	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Quantidade	2	2	2
Altura	0,0458 m	0,0286 m	0,0230
Diâmetro	0,0383 m	0,0425 m	0,0645
Tensão nominal	7,5 kV	4,0 kV	3,5 kV
Tensão de operação contínua	6,0 kV	3,2 kV	2,8 kV
Capacidade de absorção de energia	3,6 kJ/kV	1,0 kJ/kV	-
Corrente nominal de descarga	10 kA	10 kA	10 kA
Tensão residual para impulso atmosférico de 5 kA	19,55 kV	12,00 kV	7,50 kV
Tensão residual para impulso atmosférico de 10 kA	21,0 kV	13,0 kV	8,5 kV
Tensão residual para impulso atmosférico de 20 kA	23,85 kV	-	-

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

Ao utilizar varistores com características físicas e elétricas distintas, pretende-se verificar a generalidade da técnica proposta, ou seja, verificar seu comportamento diante diferentes bases de dados obtidas a partir dos ensaios.

## 4.2 Ensaio de Tensão Residual

Tensão residual ou tensão de descarga (IEEE W. G. 3.4.14, 2005) é o valor de pico da tensão presente nos terminais de um pára-raios durante a passagem de um impulso de corrente (IEC, 2001). Os impulsos de corrente utilizados nos ensaios de tensão residual são padronizados de acordo com normas internacionais (IEEE W. G. 3.4.14, 2005; POWER SYSTEMS INSTRUMENTATION AND MEASUREMENTS COMMITTEE, 1995). A forma de onda de um impulso de corrente típico é mostrada na Figura 4.2.

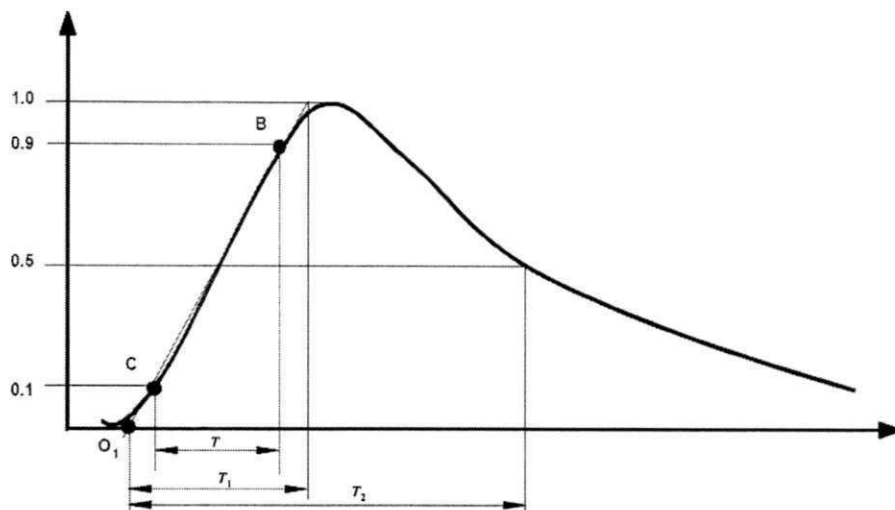


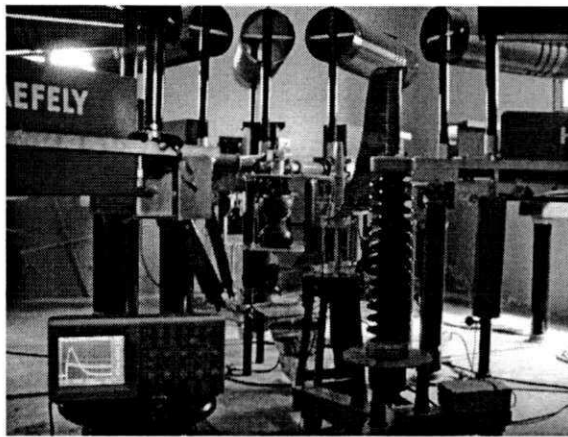
Figura 4.2 – Impulso de corrente típico.

Na Figura 4.2, tem-se que  $T_1$  representa o tempo de frente virtual, o qual é definido como sendo 1,25 vezes o intervalo de tempo,  $T$ , entre os instantes nos quais o impulso está com 10% (ponto C) e 90% (ponto B) de sua amplitude máxima. A origem virtual,  $O_1$ , é o ponto definido pela intersecção da reta que passa pelos pontos B e C com o eixo horizontal. O tempo de meia cauda,  $T_2$ , corresponde ao intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante no qual a cauda do impulso atinge 50% do seu pico. Dessa forma, quando se diz que um impulso de corrente tem forma de onda 8/20  $\mu\text{s}$ , significa que este impulso possui um tempo de frente virtual de 8  $\mu\text{s}$  e um tempo de meia cauda de 20  $\mu\text{s}$ .

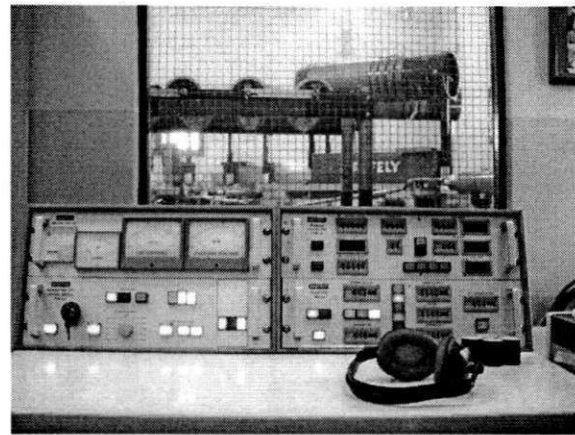
A seguir, é feita uma breve descrição dos procedimentos para a realização dos ensaios de tensão residual.

#### 4.2.1 Geração de Impulso de Corrente

Os ensaios de tensão residual foram realizados utilizando-se o gerador de impulso de corrente (80 kJ/100 kV) da Haefely, existente no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Com o gerador é possível realizar ensaios de impulsos de corrente atmosféricos (forma de onda 8/20  $\mu\text{s}$ ) e impulsos de alta corrente (forma de onda 4/10  $\mu\text{s}$ ), entre outros (MODRUSAN *et al.*, 1997). Na Figura 4.3 são mostradas fotografias do gerador de impulso de corrente e de sua mesa de controle.



(a)



(b)

**Figura 4.3** – Fotografias: (a) Gerador de impulso de corrente; (b) Mesa de controle.

O gerador possui 8 estágios, onde cada estágio é formado por um capacitor de  $2 \mu\text{F}$  (100 kV) e uma resistência de amortecimento variável. Os estágios podem ser interligados em paralelo de forma a aumentar a energia liberada no impulso de corrente. Uma fonte de alimentação alternada com tensão regulável entre 0 e 220 V, acoplada a um transformador de alta tensão é capaz de elevar a tensão de pico do secundário até 100 kV. A função da fonte de alimentação é carregar os capacitores. A tensão de carregamento é ajustada através da mesa de controle do gerador (Figura 4.3(b)).

Esquemáticamente, o gerador pode ser representado de acordo com o circuito mostrado na Figura 4.4. A função do diodo  $D$  é retificar a tensão que carregará os capacitores. O capacitor  $C$  e o resistor  $R$  representam a capacitância e a resistência equivalentes dos estágios do gerador, respectivamente. O indutor  $L$  em conjunto com a capacitância e resistência equivalentes são responsáveis por determinar a forma de onda do impulso de corrente a ser produzido pelo gerador.

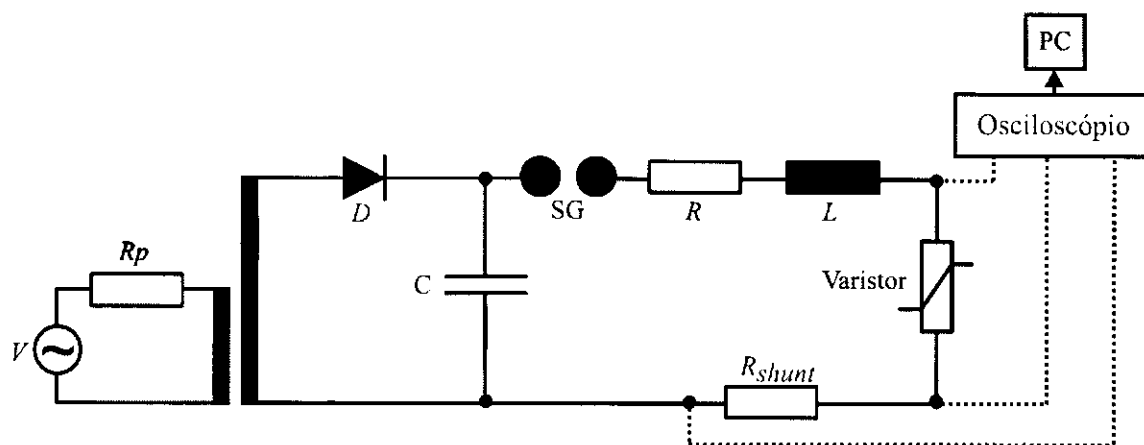


Figura 4.4 – Esquema do arranjo experimental utilizado no ensaio de tensão residual.

O funcionamento do circuito do gerador de impulso de corrente é descrito a seguir. Inicialmente, estipula-se um valor para a tensão de carregamento na mesa de controle. Realiza-se, então, o afastamento do espinterômetro (SG) e inicia-se o carregamento dos capacitores. Quando os capacitores estão carregados, desliga-se a fonte de alimentação e diminui-se gradativamente a distância entre as semi-esferas do espinterômetro até que ocorra uma descarga. A descarga então percorrerá o objeto de teste, no caso um varistor de ZnO, produzindo assim uma tensão residual.

Para obter impulsos de corrente com amplitude em torno de 10 kA e formas de onda do tipo 8/20  $\mu\text{s}$  (impulso de corrente atmosférico) e 4/10  $\mu\text{s}$  (descarga de alta corrente), o gerador foi configurado de acordo com os parâmetros apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente.

**Tabela 4.2** – Parâmetros do gerador de impulso de corrente para um impulso 8/20  $\mu\text{s}$ .

Parâmetros/Varistor	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Quantidade utilizada de estágios do gerador	5	5	5
Tensão de carregamento (kV)	33,0	25,0	20,0
Capacitância equivalente C ( $\mu\text{F}$ )	10,0	10,0	10,0
Resistência de amortecimento equivalente R ( $\Omega$ )	1,0	1,0	1,0
Indutância L ( $\mu\text{H}$ )	5,7	5,7	5,7



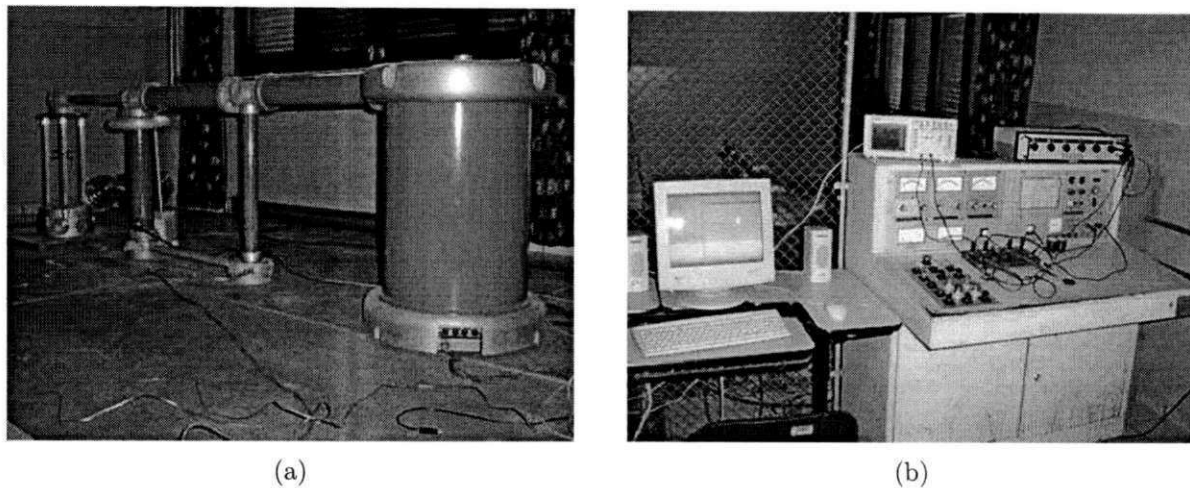
**Tabela 4.3** – Parâmetros do gerador de impulso de corrente para um impulso 4/10  $\mu\text{s}$ .

Parâmetros/Varistor	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Quantidade utilizada de estágios do gerador	5	5	5
Tensão de carregamento (kV)	26,0	18,5	15,0
Capacitância equivalente C ( $\mu\text{F}$ )	10,0	10,0	10,0
Resistência de amortecimento equivalente R ( $\Omega$ )	0,48	0,48	0,48
Indutância L ( $\mu\text{H}$ )	0,885	0,885	0,885

Os sinais de tensão e corrente no varistor, resultantes das descargas, são capturados através de uma ponta de prova de alta tensão e uma resistência “shunt” ( $R_{shunt}$ ), respectivamente, em conjunto com um sistema de aquisição de dados, formado por um osciloscópio digital e uma rotina de aquisição de dados desenvolvida no Matlab® (VILELA *et al.*, 2005). Os sinais capturados neste ensaio serão utilizados para aplicar e validar a técnica de estimação de parâmetros proposta nesta dissertação.

### 4.3 Ensaio de Aplicação de Tensão na Frequência Industrial

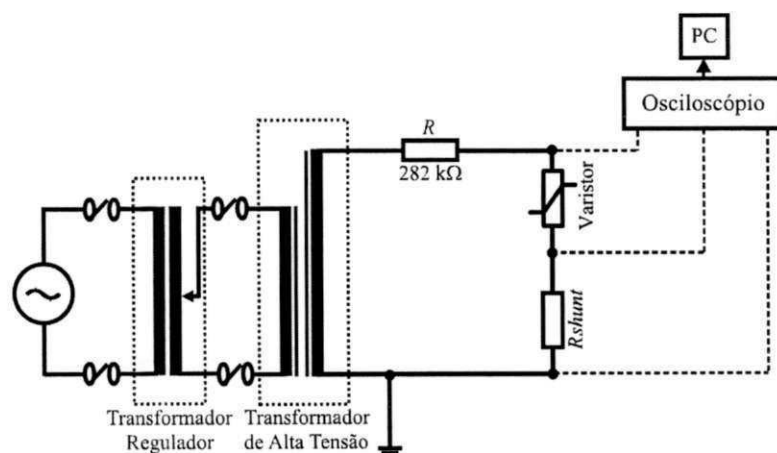
Este ensaio tem por finalidade submeter os varistores de ZnO a níveis crescentes de tensões na frequência industrial. Para cada nível de tensão submetido, mede-se a corrente que percorre o pára-raios. Com os pares de tensão e corrente é possível determinar a curva característica de cada varistor na região de baixa corrente da curva  $V-I$  do pára-raios (ver Figura 2.1). Estes ensaios foram realizados no Kit de Alta Tensão existente no LAT/UFCG. Fotografias do Kit de Alta Tensão, da sua mesa de controle e do sistema de aquisição de dados utilizado no ensaio são mostradas na Figura 4.5.



**Figura 4.5** – Fotografias: (a) Kit de Alta Tensão; (b) Mesa de controle e sistema de aquisição de dados.

O diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado no ensaio de aplicação de tensão na frequência industrial é mostrado na Figura 4.6. O circuito, basicamente, é composto de uma fonte de tensão senoidal regulável, um transformador elevador de tensão, uma resistência de proteção  $R$  em série com um varistor (objeto de teste) e com uma resistência “shunt” ( $R_{shunt}$ ).

Assim como no ensaio de tensão residual, os sinais de tensão e corrente no varistor são capturados através de uma ponta de prova de alta tensão e uma resistência “shunt” ( $R_{shunt}$ ), respectivamente, em conjunto com um sistema de aquisição de dados. Os dados adquiridos são, então, armazenados em um PC para tratamento posterior.



**Figura 4.6** – Esquema do arranjo experimental utilizado no ensaio de tensão na frequência industrial.

## 4.4 Características $V-I$ dos Varistores de ZnO

Com os dados obtidos nos ensaios de aplicação de tensão na frequência industrial e tensão residual para impulso de corrente atmosférico (forma de onda 8/20  $\mu\text{s}$ ) é possível determinar as curvas características dos seis varistores de ZnO ensaiados, tomando-se os picos das tensões e correntes obtidos nos ensaios. Nas Tabelas 4.4 a 4.6 são apresentados os pares de tensão e corrente das curvas características dos varistores dos tipos 1, 2 e 3, respectivamente. As curvas obtidas, conforme dito anteriormente, serão utilizadas em procedimentos de ajustes comumente empregados na literatura, os quais serão alvo de análise no Capítulo 5. A técnica de estimação proposta dispensa a realização do ensaio de aplicação de tensão na frequência industrial e o conhecimento de curvas características.

**Tabela 4.4** – Características  $V-I$  para os varistores do tipo 1.

Varistor 1		Varistor 2	
Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)
1240,0	$3,0 \cdot 10^{-4}$	940,0	$6,0 \cdot 10^{-4}$
4480,0	$5,0 \cdot 10^{-4}$	3000,0	$2,3 \cdot 10^{-3}$
7800,0	$8,0 \cdot 10^{-4}$	4320,0	$3,8 \cdot 10^{-3}$
11400,0	$6,9 \cdot 10^{-3}$	6000,0	$5,9 \cdot 10^{-3}$
11800,0	$22,8 \cdot 10^{-3}$	7200,0	$8,2 \cdot 10^{-3}$
12200,0	$40,8 \cdot 10^{-3}$	8400,0	$11,4 \cdot 10^{-3}$
16213,3	865,3	10200,0	$23,2 \cdot 10^{-3}$
17160,0	2732,5	17200,0	3110,0
18160,0	5272,2	18000,0	5315,0
18866,7	7552,2	18800,0	7780,0
19506,7	9955,7	19400,0	10050,0
19986,7	12055,7	20000,0	12524,0

**Tabela 4.5** – Características  $V-I$  para os varistores do tipo 2.

Varistor 1		Varistor 2	
Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)
1140,0	$4,0 \cdot 10^{-4}$	1620,0	$4,0 \cdot 10^{-4}$
3200,0	$1,4 \cdot 10^{-3}$	3840,0	$7,0 \cdot 10^{-4}$
4640,0	$2,7 \cdot 10^{-3}$	6480,0	$1,3 \cdot 10^{-3}$
6800,0	$7,0 \cdot 10^{-3}$	7200,0	$6,2 \cdot 10^{-3}$
8000,0	$13,2 \cdot 10^{-3}$	7400,0	$15,4 \cdot 10^{-3}$
8100,0	$44,0 \cdot 10^{-3}$	7600,0	$29,6 \cdot 10^{-3}$
9280,0	1118,3	7800,0	$39,6 \cdot 10^{-3}$
9640,0	2127,8	9853,3	791,9
10021,3	3610,4	10840,0	2724,9
10309,3	4812,1	11786,7	6332,7
10634,7	7215,7	12400,0	9639,5
10880,0	8678,1	12653,3	10904,5
11026,7	10056,9	-	-
11186,7	11157,5	-	-

**Tabela 4.6** – Características  $V-I$  para os varistores do tipo 3.

Varistor 1		Varistor 2	
Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)
2560,0	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2560,0	$1,2 \cdot 10^{-3}$
4720,0	$2,6 \cdot 10^{-3}$	3200,0	$1,3 \cdot 10^{-3}$
5120,0	$13,8 \cdot 10^{-3}$	5120,0	$4,3 \cdot 10^{-3}$
5520,0	$30,8 \cdot 10^{-3}$	5440,0	$16,6 \cdot 10^{-3}$
5600,0	$51,2 \cdot 10^{-3}$	5680,0	$26,0 \cdot 10^{-3}$
7120,0	2540,2	5840,0	$40,0 \cdot 10^{-3}$
7493,3	5366,2	7560,0	2380,8
7666,7	7954,5	7893,3	5115,8
7746,7	9095,5	8120,0	7954,5
7866,7	10638,8	8226,7	9424,4
-	-	8306,7	10702,1

No próximo capítulo são apresentados os resultados e as análises decorrentes da aplicação da técnica de estimação de parâmetros ao modelo do IEEE, utilizando os dados obtidos nos ensaios de tensão residual para impulsos de corrente atmosférico e de alta corrente. Em seguida, no mesmo capítulo, são feitas comparações entre o modelo ajustado através da técnica de estimação paramétrica e os modelos convencional e do IEEE com parâmetros ajustados manualmente. O modelo convencional é determinado a partir das características  $V-I$  obtidas anteriormente.

# Capítulo 5

## Resultados e Análises

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos após a aplicação da técnica de estimação de parâmetros ao modelo de pára-raios de ZnO proposto pelo IEEE. Os parâmetros do modelo foram ajustados para cada um dos seis varistores ensaiados. São realizadas comparações entre as formas de onda das tensões residuais ajustadas e medidas em laboratório, a fim de validar a técnica de estimação. Além disso, é avaliado o comportamento do modelo do IEEE ajustado ao ser submetido a um impulso de alta corrente obtido em laboratório. Por fim, são realizadas comparações dos resultados obtidos através do modelo do IEEE ajustado pela técnica de estimação de parâmetros, com aqueles obtidos através do modelo convencional de pára-raios de ZnO e pelo modelo do IEEE ajustado manualmente.

### 5.1 Estimação dos Parâmetros do Modelo do IEEE

Os parâmetros do modelo do IEEE foram estimados a partir dos dados obtidos nos ensaios de tensão residual para impulso de corrente atmosférico, realizados em seis varistores de ZnO. Vários conjuntos de estimativas iniciais dos parâmetros foram testados. Para todos os testes realizados a técnica convergiu, ou seja, ela forneceu um minimizador local (conjunto de parâmetros do modelo do IEEE) do problema. Devido às características do próprio método de otimização adotado, o minimizador local encontrado em um primeiro instante nem sempre proporcionou os melhores resultados. Sendo assim, em alguns casos, aplicou-se novamente a técnica de estimação de parâmetros considerando como estimativas iniciais o conjunto de parâmetros encontrado após uma aplicação prévia da técnica de estimação. Na Tabela 5.1 é apresentado o conjunto de estimativas iniciais que forne-

ceu os melhores resultados, em termos de eficiência computacional, para todos os casos analisados, uma vez que o mesmo dispensou, na maioria das vezes, uma nova aplicação da técnica de ajuste de parâmetros.

**Tabela 5.1** – Estimativas iniciais dos parâmetros.

$R_0$ ( $\Omega$ )	$L_0$ ( $\mu\text{H}$ )	$C_0$ (nF)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$L_1$ ( $\mu\text{H}$ )
$\approx 0,5$	$\approx 0,5$	$\approx 10$	$\approx 0,05$	$\approx 0,5$

O passo de integração adotado nas simulações foi da ordem de 2 ns, devido à taxa de aquisição dos dados obtidos em laboratório e a constante de tempo do circuito.

A concordância entre as formas de onda das tensões residuais medidas e obtidas a partir do modelo do IEEE com parâmetros ajustados, e portanto, a qualidade da estimação de parâmetros realizada foi avaliada a partir do coeficiente de determinação ou estatística  $R^2$ , pois ela é normalmente empregada em situações práticas como a mostrada aqui, uma vez que ela possibilita análises mais confiáveis que possíveis inspeções visuais realizadas nos gráficos das tensões (THE MATHWORKS, INC., 2007).

O coeficiente de determinação  $R^2$  é uma medida da capacidade que um modelo ajustado para um conjunto de parâmetros possui em representar um determinado conjunto de dados. Ele é definido como sendo 01 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 do sinal medido ( $SST$ ), de acordo com a seguinte equação (THE MATHWORKS, INC., 2007; SPIEGEL *et al.*, 2001):

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (5.1)$$

onde:

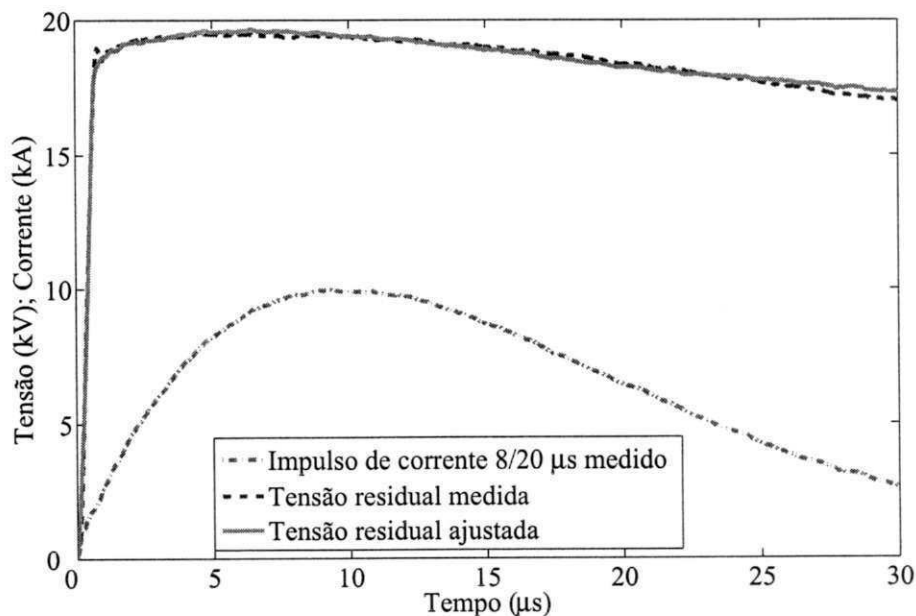
$$SSE = \sum_{j=1}^m [\mathbf{v}_m(j) - \mathbf{v}_1(j)]^2 \quad \text{e} \quad SST = \sum_{j=1}^m [\mathbf{v}_m(j) - \bar{\mathbf{v}}_m]^2$$

em que,  $\mathbf{v}_m(j)$  e  $\mathbf{v}_1(j)$  são os valores medidos e calculados da tensão residual, respectivamente;  $m$  é o número de amostras; e  $\bar{\mathbf{v}}_m$  é valor médio da tensão medida. Caso  $SSE$  seja pequeno, ou seja, os valores da tensão residual fornecidos pelo modelo do IEEE para determinado conjunto de parâmetros, estejam próximos dos valores de tensão residual medidos, o coeficiente de determinação  $R^2$  se aproximará de 01, indicando, portanto, uma boa concordância entre as formas de onda dos sinais de tensão calculados e medidos.

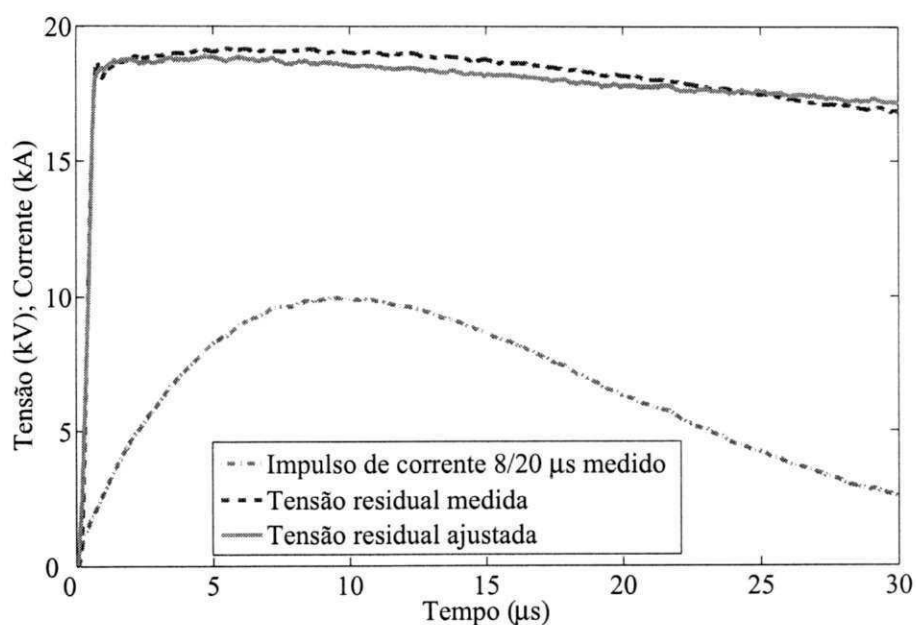
Após essa definição, são apresentados na Tabela 5.2 os parâmetros estimados do modelo do IEEE, para cada um dos conjuntos de dados obtidos nos ensaios de tensão residual realizados em seis varistores de ZnO. Além dos parâmetros estimados, é apresentado o coeficiente de determinação  $R^2$ , para que seja possível verificar a qualidade dos ajustes realizados. Nas Figuras 5.1 a 5.6 são apresentadas as formas de onda da tensão residual medida e fornecida pelo modelo do IEEE ajustado com os parâmetros da Tabela 5.2, para os impulsos de corrente atmosféricos obtidos experimentalmente.

**Tabela 5.2** – Resultados obtidos a partir da técnica de estimação de parâmetros.

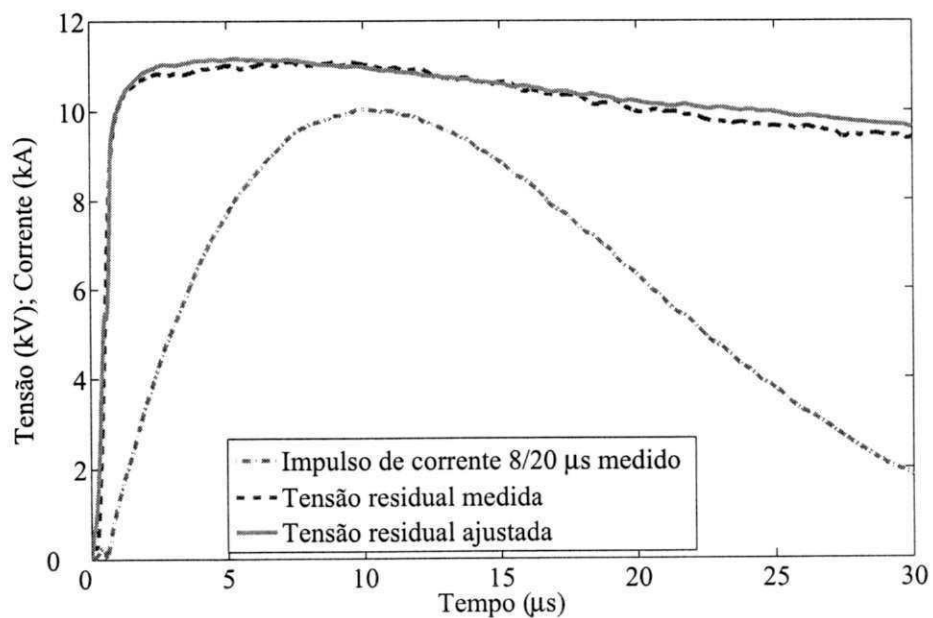
Varistor	$R_0$ ( $\Omega$ )	$L_0$ (H)	$C_0$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$L_1$ (H)	$R^2$
1 do Tipo 1	$5,000 \cdot 10^{-1}$	$1,731 \cdot 10^{-7}$	$9,172 \cdot 10^{-8}$	$5,000 \cdot 10^{-2}$	$7,523 \cdot 10^{-7}$	0,993
2 do Tipo 1	$7,240 \cdot 10^{-1}$	$2,629 \cdot 10^{-7}$	$7,674 \cdot 10^{-8}$	$8,675 \cdot 10^{-6}$	$5,294 \cdot 10^{-7}$	0,966
1 do Tipo 2	$5,000 \cdot 10^{-1}$	$2,471 \cdot 10^{-7}$	$1,154 \cdot 10^{-8}$	$5,000 \cdot 10^{-2}$	$3,252 \cdot 10^{-7}$	0,970
2 do Tipo 2	$5,000 \cdot 10^{-1}$	$2,866 \cdot 10^{-7}$	$2,834 \cdot 10^{-8}$	$5,000 \cdot 10^{-2}$	$2,153 \cdot 10^{-7}$	0,989
1 do Tipo 3	$5,000 \cdot 10^{-1}$	$3,658 \cdot 10^{-7}$	$7,841 \cdot 10^{-8}$	$5,586 \cdot 10^{-6}$	$5,706 \cdot 10^{-6}$	0,980
2 do Tipo 3	$5,000 \cdot 10^{-1}$	$4,738 \cdot 10^{-7}$	$8,436 \cdot 10^{-8}$	$5,198 \cdot 10^{-6}$	$5,000 \cdot 10^{-6}$	0,977



**Figura 5.1** – Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente 8/20  $\mu$ s aplicado ao varistor 1 do Tipo 1.

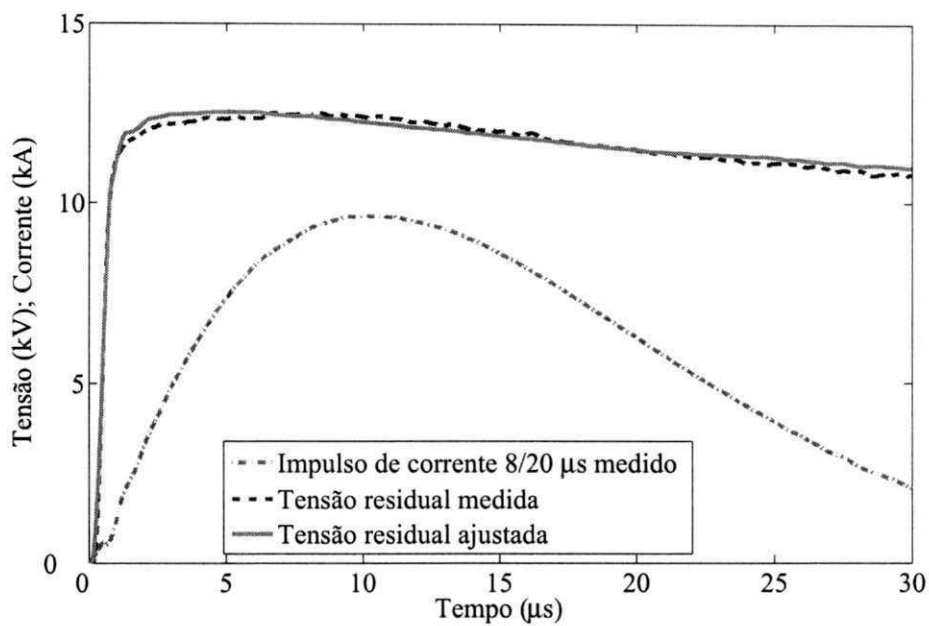


**Figura 5.2** – Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente 8/20  $\mu\text{s}$  aplicado ao varistor 2 do Tipo 1.

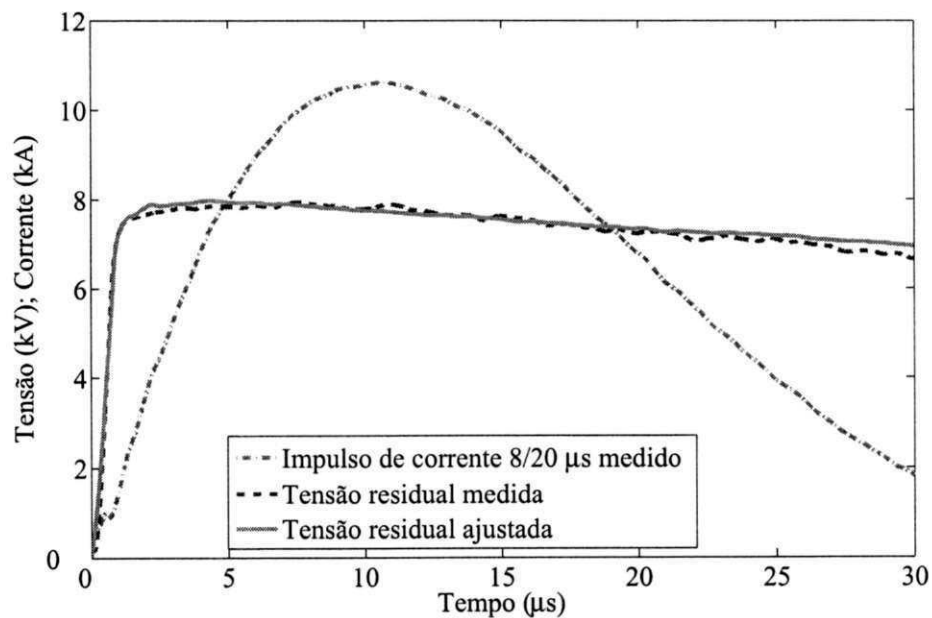


**Figura 5.3** – Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente 8/20  $\mu\text{s}$  aplicado ao varistor 1 do Tipo 2.

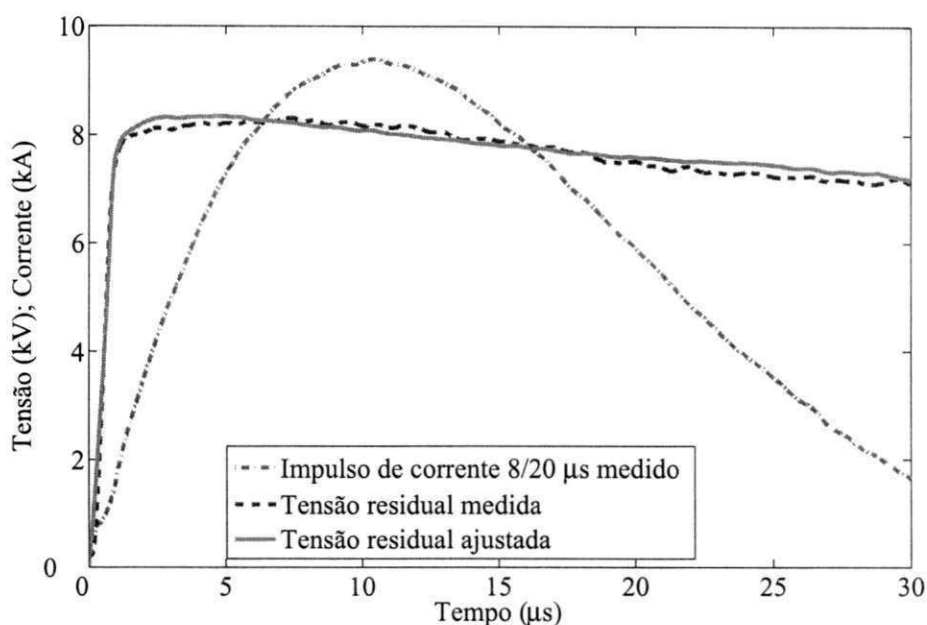




**Figura 5.4** – Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente 8/20  $\mu\text{s}$  aplicado ao varistor 2 do Tipo 2.



**Figura 5.5** – Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente 8/20  $\mu\text{s}$  aplicado ao varistor 1 do Tipo 3.

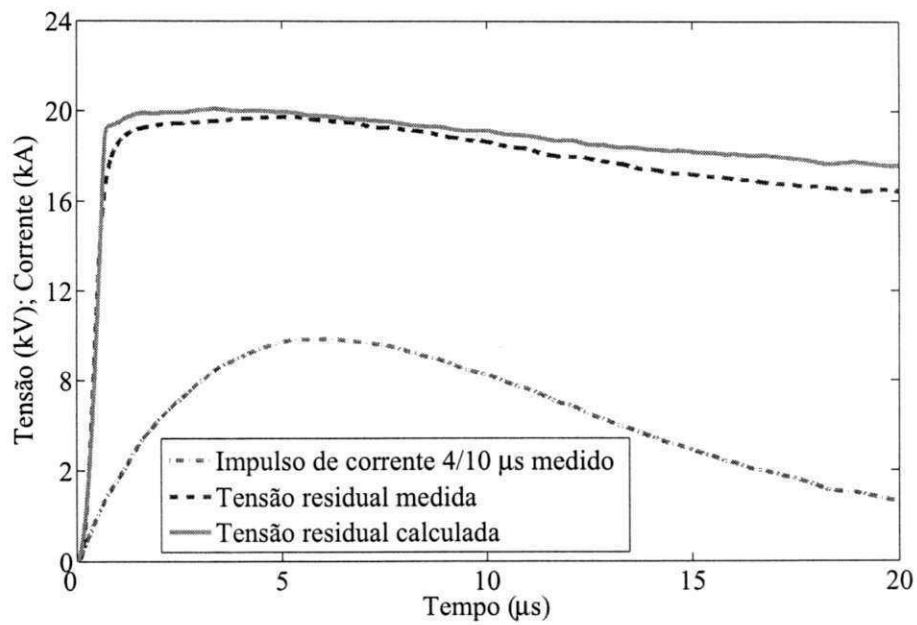


**Figura 5.6** – Formas de onda das tensões residuais medida e ajustada para um impulso de corrente 8/20  $\mu\text{s}$  aplicado ao varistor 2 do Tipo 3.

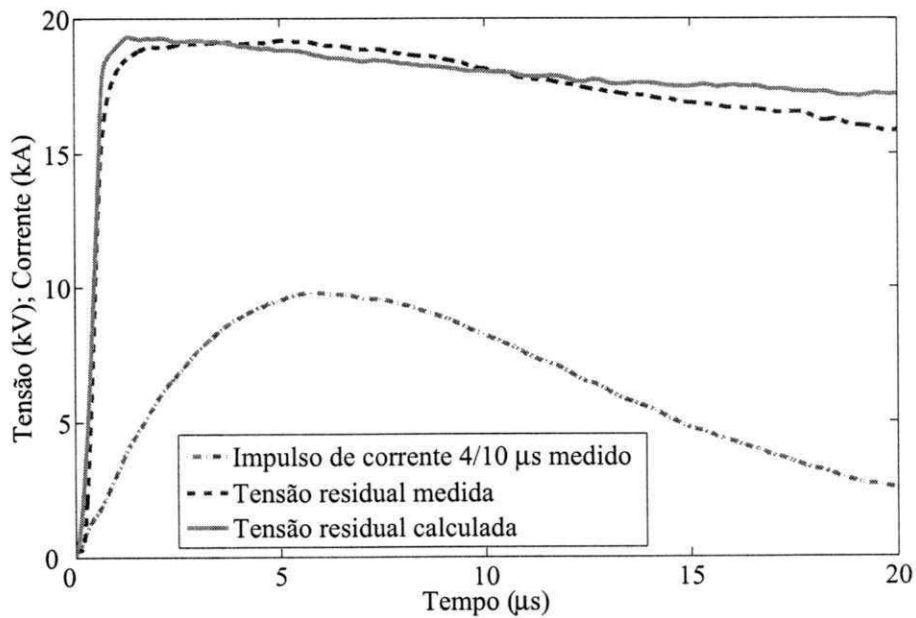
Com base nos valores do coeficiente de determinação  $R^2$ , apresentados na Tabela 5.2, e na observação das formas de onda mostradas nas Figuras 5.1 a 5.6, pode-se concluir que o modelo do IEEE foi ajustado com boa precisão para todos os conjuntos de dados utilizados. Pode-se observar ainda que, os valores de  $R^2$  foram todos acima de 0,96, indicando que pelo menos 96% do comportamento da forma de onda da tensão residual medida pode ser explicada pelo modelo do IEEE considerando os parâmetros estimados e apresentados na Tabela 5.2.

## 5.2 Testes com Impulsos de Alta Corrente

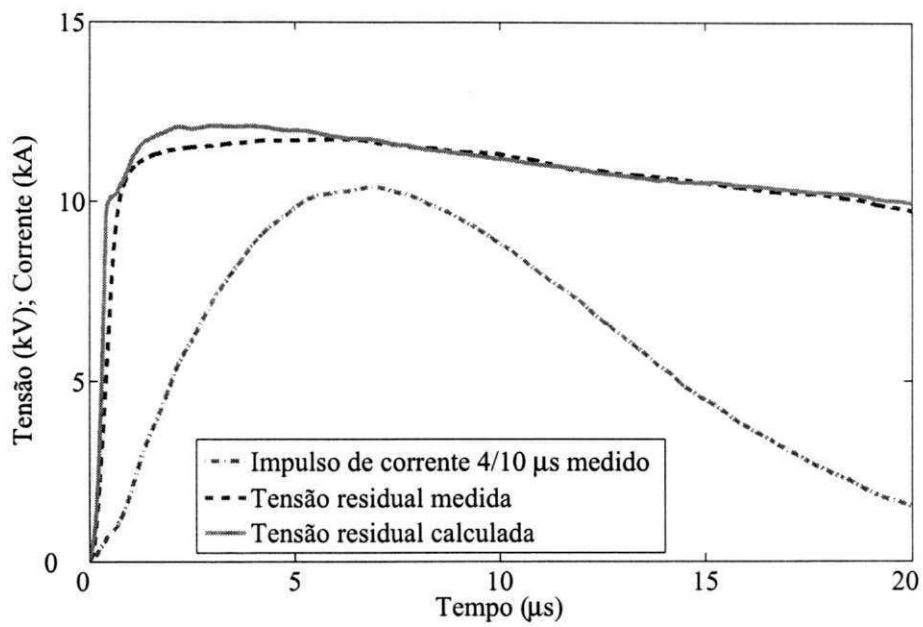
O modelo do IEEE deve funcionar adequadamente para surtos com tempos de frente compreendidos no intervalo de 0,5 a 45  $\mu\text{s}$  (IEEE W. G. 3.4.11, 1992). Assim, com o intuito de validar o modelo e o ajuste paramétrico realizado, foram aplicados impulsos de alta corrente (forma de onda 4/10  $\mu\text{s}$ ), obtidos experimentalmente, nos terminais de entrada do modelo do IEEE ajustado com os parâmetros apresentados na Tabela 5.2. Dessa forma, para cada um dos seis varistores ensaiados, têm-se as formas de onda da tensão residual medida e calculada, conforme mostrado nas Figuras 5.7 a 5.12.



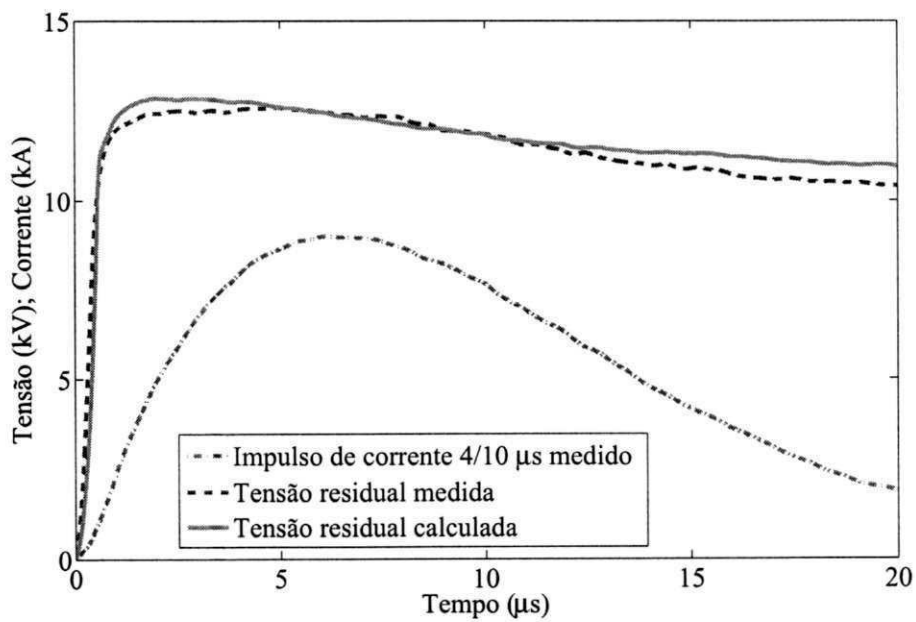
**Figura 5.7** – Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente  $4/10 \mu\text{s}$  aplicado ao varistor 1 do Tipo 1.



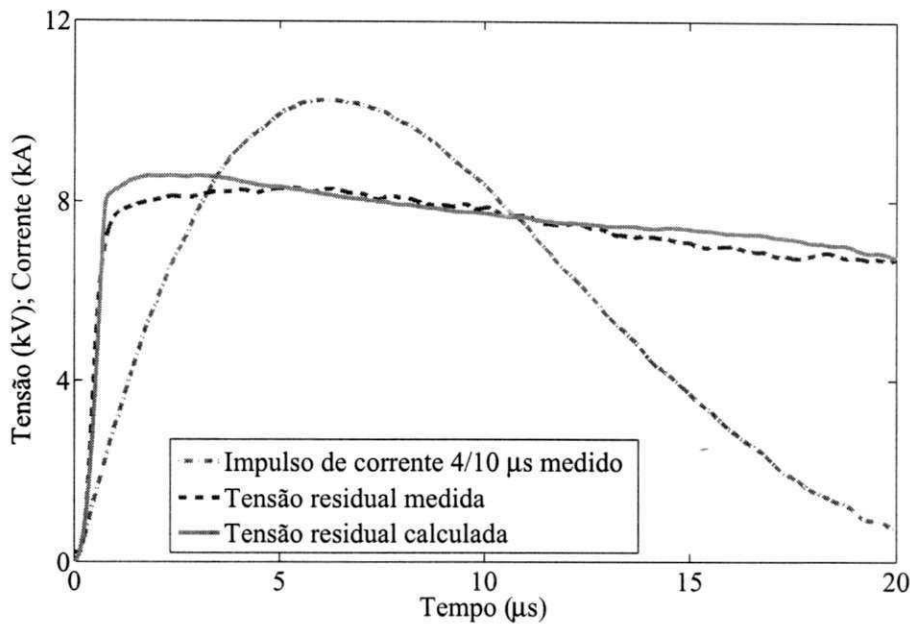
**Figura 5.8** – Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente  $4/10 \mu\text{s}$  aplicado ao varistor 2 do Tipo 1.



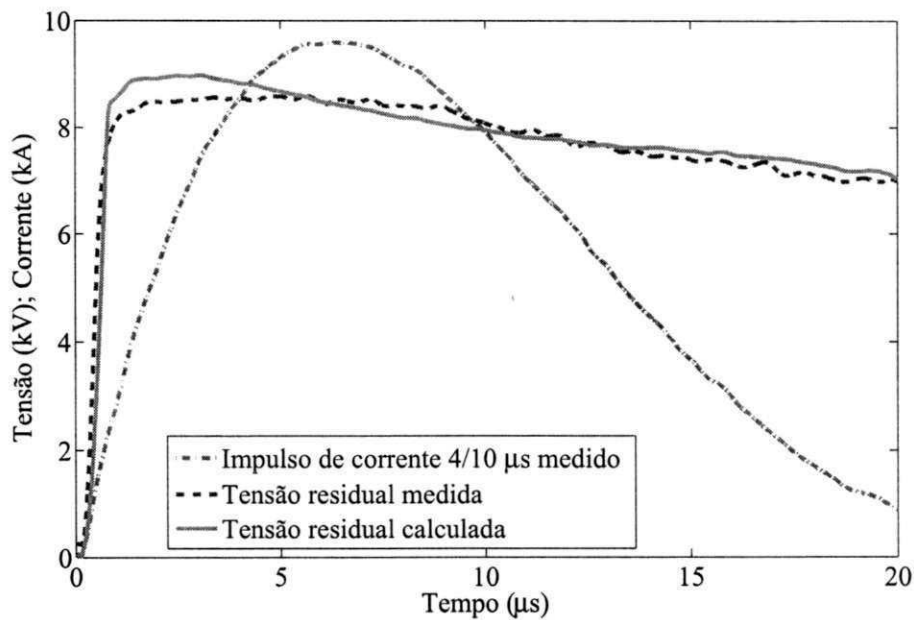
**Figura 5.9** – Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente 4/10  $\mu\text{s}$  aplicado ao varistor 1 do Tipo 2.



**Figura 5.10** – Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente 4/10  $\mu\text{s}$  aplicado ao varistor 2 do Tipo 2.



**Figura 5.11** – Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente 4/10  $\mu\text{s}$  aplicado ao varistor 1 do Tipo 3.



**Figura 5.12** – Formas de onda das tensões residuais medida e calculada para um impulso de corrente 4/10  $\mu\text{s}$  aplicado ao varistor 2 do Tipo 3.

Analisando os gráficos das Figuras 5.7 a 5.12 e os dados da Tabela 5.3, é possível verificar que o modelo do IEEE, ajustado com os parâmetros apresentados na Tabela 5.2, representou o comportamento dos seis pára-raios ensaiados diante transitórios rápidos, com boa precisão. O coeficiente de determinação  $R^2$  manteve-se acima de 0,90 em todos

os casos analisados, demonstrado assim, que o modelo do IEEE ajustado foi capaz de explicar 90% do comportamento da forma de onda da tensão residual medida.

**Tabela 5.3** – Resultados para o modelo do IEEE ajustado quando submetido a impulso de alta corrente.

	Varistor					
	1 do Tipo 1	2 do Tipo 1	1 do Tipo 2	2 do Tipo 2	1 do Tipo 3	2 do Tipo 3
$R^2$	0,912	0,937	0,900	0,910	0,940	0,916

Podem-se observar que o valor médio do coeficiente de determinação, neste caso, não foi tão elevado quanto aqueles apresentados na Tabela 5.2. Este comportamento era esperado, uma vez que o modelo do IEEE foi ajustado para impulsos de corrente atmosférico e não para impulsos de alta corrente.

### 5.3 Comparações com Procedimentos Comumente Empregados no Ajuste de Modelos

Em estudos de transitórios rápidos em sistemas de potência, os pára-raios de ZnO são normalmente representados através dos modelos convencional e dinâmico proposto pelo IEEE, conforme já foi descrito no Capítulo 2. Dessa forma, pretende-se nesta seção realizar um estudo comparativo do desempenho dos modelos convencional e proposto pelo IEEE (considerando o procedimento manual de ajuste de parâmetros) mediante impulsos de corrente atmosférico e de alta corrente. Os resultados desses testes serão então, confrontados com aqueles obtidos nas seções anteriores, ou seja, quando aplicou-se a técnica de estimação de parâmetros proposta neste trabalho no ajuste do modelo do IEEE.

Inicialmente, ajustou-se o modelo convencional de pára-raios de ZnO através dos pontos das curvas características, obtidas para cada um dos seis varistores ensaiados, as quais foram apresentadas no Capítulo 4. Em seguida, nas simulações digitais realizadas no ATP, utilizou-se como fontes de corrente as formas de onda digitalizadas dos impulsos de corrente atmosférico e de alta corrente, medidos em laboratório, aplicado-as aos terminais de entrada do modelo, obtendo-se, assim, a tensão residual sobre o pára-raios. Nas

Tabelas 5.4 e 5.5 são apresentados os valores de  $R^2$  para cada um dos seis varistores ensaiados. Conforme pode-se verificar, os valores de  $R^2$  foram bem abaixo daqueles obtidos através do uso da técnica de estimação de parâmetros proposta no ajuste do modelo do IEEE. De certa forma, isto já era esperado, pois o modelo convencional não representa a característica dinâmica dos pára-raios de ZnO, e portanto, para estudos de transitórios rápidos é desaconselhável seu uso.

As mesmas comparações foram realizadas com o modelo do IEEE considerando o procedimento de ajuste manual dos seus parâmetros, conforme proposto em IEEE W. G. 3.4.11 (1992). Ajustou-se então, manualmente, os parâmetros do modelo do IEEE para cada um dos seis varistores ensaiados. Novamente, utilizou-se como fontes de corrente as formas de onda digitalizadas dos impulsos de corrente atmosférico e de alta corrente aplicados a cada um dos varistores ensaiados, obtendo-se assim as tensões residuais nos pára-raios. Todas as simulações foram realizadas no ATP. Nas Tabelas 5.4 e 5.5 são apresentados os valores do coeficiente de determinação  $R^2$  para cada um dos testes realizados. Novamente, os resultados conseguidos com a técnica de estimação de parâmetros foram mais precisos do que aqueles obtidos através do modelo do IEEE com parâmetros ajustados manualmente.

**Tabela 5.4** – Comparações entre modelos quando submetidos a impulsos de corrente atmosféricos.

Varistor	Coeficiente de determinação $R^2$		
	Técnica de estimação de parâmetros	Modelo convencional	Modelo do IEEE ajustado manualmente
1 do Tipo 1	0,993	0,393	0,255
2 do Tipo 1	0,966	0,639	0,403
1 do Tipo 2	0,970	0,452	0,837
2 do Tipo 2	0,989	0,548	0,739
1 do Tipo 3	0,980	0,431	0,352
2 do Tipo 3	0,977	0,394	0,329

**Tabela 5.5** – Comparações entre modelos quando submetidos a impulsos de alta corrente.

Varistor	Coeficiente de determinação $R^2$		
	Técnica de estimação de parâmetros	Modelo convencional	Modelo do IEEE ajustado manualmente
1 do Tipo 1	0,912	0,429	0,395
2 do Tipo 1	0,937	0,606	0,304
1 do Tipo 2	0,900	0,424	0,636
2 do Tipo 2	0,910	0,596	0,799
1 do Tipo 3	0,940	0,484	0,517
2 do Tipo 3	0,916	0,510	0,673

Analisando minuciosamente os valores dos coeficientes de determinação apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5, é possível constatar a não uniformidade (variação de mais de 60% nos coeficientes de determinação) dos resultados obtidos para os modelos convencional e do IEEE com parâmetros ajustados manualmente, demonstrando assim, a falta de confiabilidade inerente aos modelos e procedimentos comumente empregados na literatura. Enquanto que, para a técnica de estimação de parâmetros proposta nesta dissertação, aplicada ao modelo de pára-raios de ZnO proposto pelo IEEE, é possível verificar uniformidade (variação máxima de 4% nos coeficientes de determinação) nos bons resultados obtidos tanto para impulsos de corrente atmosférico quanto para impulsos alta corrente, confirmando, portanto, a precisão e confiabilidade da técnica proposta com relação a outras abordagens.



# Capítulo 6

## Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma técnica de estimação de parâmetros para o modelo de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) proposto pelo IEEE. A técnica baseou-se no ajuste das formas de onda da tensão residual fornecida pelo modelo e aquela medida em laboratório durante ensaios de tensão residual para impulsos de corrente atmosféricos (forma de onda 8/20  $\mu$ s), realizados em seis varistores (seções de teste) de ZnO. Embora a técnica tenha sido aplicada a seções de teste é possível utilizá-la em pára-raios completos, uma vez que a tensão residual em um pára-raios completo é proporcional àquela obtida a partir de uma seção de teste.

A qualidade dos ajustes de parâmetros realizados e, portanto, a concordância entre as formas de onda da tensão residual medida e obtida a partir do modelo ajustado foi quantificada através do coeficiente de determinação  $R^2$ . Em todos os casos analisados, obteve-se valores de  $R^2$  maiores que 0,96, indicando assim, que cerca de 96% do comportamento da forma de onda da tensão residual medida pôde ser explicada pelo modelo do IEEE ajustado. Estes resultados validam a técnica de estimação proposta.

O desempenho do modelo do IEEE ajustado e validado foi avaliado para impulsos de alta corrente (amplitude de 10 kA e forma de onda 4/10  $\mu$ s). Embora o modelo tenha sido ajustado para impulsos de corrente atmosféricos, bons resultados também foram obtidos neste teste. O coeficiente de determinação  $R^2$  forneceu valores maiores que 0,9 para os seis casos analisados, ou seja, pelo menos 90% do comportamento da forma de onda tensão residual medida pode ser explicada pelo modelo ajustado. Conclui-se assim, que é possível utilizar o modelo do IEEE ajustado em estudos de transitórios mais rápidos.

Por fim, foram realizadas comparações entre a técnica de estimação proposta e os modelos de pára-raios convencional e proposto pelo IEEEE, considerando o procedimento de ajuste manual dos parâmetros, uma vez que tais modelos e procedimentos são comumente empregados em estudos encontrados na literatura. Em todos os casos analisados, os resultados obtidos através da técnica de estimação foram bem superiores àqueles obtidos através dos demais procedimentos. Ainda mais, os resultados fornecidos pelos modelos convencional e proposto pelo IEEEE (com ajuste manual de parâmetros) não apresentaram uniformidade, ou seja, foram constatadas variações de mais 60% nos valores do coeficiente de determinação, enquanto que para a técnica de estimação paramétrica, aplicada ao modelo do IEEEE, a maior variação obtida nos resultados foi em torno de 4%.

Diante do exposto, pode-se concluir que os objetivos iniciais desta dissertação foram alcançados, uma vez que a técnica de estimação de parâmetros, aplicada ao modelo dinâmico de pára-raios de ZnO proposto pelo IEEEE, apresentou resultados precisos frente a transitórios rápidos, conforme pôde-se constatar através dos valores dos coeficientes de determinação obtidos. Foi possível verificar também, a confiabilidade da técnica proposta, uma vez que ela dispensou o conhecimento de características físicas dos pára-raios de ZnO, o uso de procedimentos manuais, baseados na tentativa e erro, para o ajuste dos parâmetros do modelo e o uso de equações empíricas, fornecendo assim, resultados bem mais consistentes do que aqueles obtidos através de outros procedimentos. Finalmente, pôde-se constatar a robustez da técnica de estimação de parâmetros proposta, que ao contrário de outra técnica de estimação paramétrica existente na literatura (LI *et al.*, 2002), é capaz de realizar o ajuste de todos os parâmetros do modelo do IEEEE ao mesmo tempo.

Como continuação do estudo aqui realizado, propõe-se:

- Avaliar outros modelos de pára-raios de ZnO destinados a estudos de transitórios rápidos e aplicar a técnica de estimação de parâmetros aqui proposta;
- Aumentar a quantidade de experimentos realizados a fim expandir o conjunto de dados. Para isso, será necessário fazer ensaios de tensão residual com impulsos ainda mais rápidos e mais lentos do que aqueles realizados, a fim de verificar o comportamento do modelo do IEEEE e de outros que porventura sejam avaliados, diante outros tipos de surtos;

- Realizar estudos de coordenação de isolamento, capacidade de absorção de energia, localização ótima, seleção correta de pára-raios, entre outros, utilizando a técnica de estimação de parâmetros proposta nesta dissertação.

# Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte, MG - Brasil: Editora UFMG, 2005.
- BAYADI, A.; HARID, N.; ZEHAR, K.; BELKHIAT, S. Simulation of Metal Oxide Surge Arrester Dynamic Behavior Under Fast Transients. In: IPST - THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. New Orleans - USA, 2003.
- CHONG, E. K. P.; ZAK, S. H. *An Introduction to Optimization*. New York, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- COSTA, E. G. *Análise do Desempenho de Pára-raios de Óxido de Zinco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Abril 1999.
- DOMMEL, H. W. *Electromagnetic Transients Program Manual (EMTP) Theory Book*. Vancouver B.C., Canada: Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.
- EDA, K. Zinc Oxide Varistors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 5, n. 6, p. 28–41, December 1989.
- FERNANDEZ, F.; DIAZ, R. Metal Oxide Surge Arrester Model for Fast Transient Simulations. In: IPST - THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. Rio de Janeiro - Brazil, 2001.
- FLETCHER, R. *Practical Methods of Optimization Volume 1 - Unconstrained Optimization*. Scotland, U.K.: John Wiley & Sons, Ltd, 1980.

- GOUDARZI, A.; MOHSENI, H. Evaluation of Mathematical Models of Metal Oxide Surge Arrester for Energy Absorption Study. In: UPEC - INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE. Bristol - UK, 2004.
- HADDAD, A.; FUENTES-ROSADO, J.; GERMAN, D.; WATERS, R. Characterization of ZnO Surge Arrester Elements with Direct and Power Frequency Voltages. *IEEE Proceedings*, v. 137, n. 5, p. 269–279, September 1990.
- HILEMAN, A. R. *Insulation Coordination for Power Systems*. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 1999.
- 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*, n. 133, p. 133–144, December 1990.
- HINRICHSEN, V. *Metal Oxide Surge Arrester Fundamentals*. Siemens AG, Berlin - Germany, 2001.
- HOFFMAN, J. D. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. New York, USA: Marcel Dekker, 2001.
- IEC. *IEC60099-4 - Surge Arresters - Part 4: Metal-oxide Surge Arresters without Gaps for A.C. Systems*. Geneve - Switzerland, 2001.
- IEEE W. G. 3.4.11. Modeling of Metal Oxide Surge Arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 1, p. 302–309, January 1992.
- IEEE W. G. 3.4.14. *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*. New York, NY - USA, 1998.
- IEEE W. G. 3.4.14. *IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Systems (>1 kV)*. New York, NY - USA, 2005.
- KELLEY, C. T. *Iterative Methods for Optimization*. Philadelphia, USA: SIAM, 1999.

- 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. *Alternative Transients Program - Rule Book*. Heverlee - Belgium, 1987.
- LI, H. J.; BIRLASEKARAM, S.; CHOI, S. S. A Parameter Identification Technique for Metal-Oxide Surge Arrester Models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 3, p. 736–741, July 2002.
- LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; FERNANDES Jr., D.; MAIA, M. J. A. Methods of Energy Computation in ZnO Surge Arrester. In: ISH - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Beijing - China, 2005a.
- LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; FERNANDES Jr., D.; QUIRINO, M. L. A.; WANDERLEY NETO, E. T.; MAIA, M. J. A. Métodos de Cálculo da Entrada de Energia em Pára-Raios - Um Estudo Comparativo. In: SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Paraná - Brasil, 2005b.
- LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; FERNANDES Jr., D.; PEREIRA, F. M. S.; MAIA, M. J. A. Análise de Desempenho de Modelos de Pára-Raios a Óxido de Zinco Frente a Surtos Rápidos. In: SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Rio de Janeiro - Brasil, 2007a.
- LIRA, G. R. S.; FERNANDES Jr., 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: IPST - INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. Lyon - France, 2007b.
- LIRA, G. R. S.; FERNANDES Jr., D.; COSTA, E. G.; MAIA, M. J. A. Behavior of Metal Oxide Surge Arresters for Fast Surges. In: CIGRE A3 TECHNICAL COLLOQUIUM. Rio de Janeiro - Brazil, 2007c.

- MADSEN, K.; NIELSEN, H. B.; TINGLEFF, O. *Methods for Non-Linear Least Squares Problems*. [S.l.], April 2004.
- MAMIS, M. S. Computation of Electromagnetic Transients on Transmission Lines with Nonlinear Components. *IEE Gener. Transm. Distrib.*, v. 150, n. 2, p. 200–204, March 2003.
- MANITOBA HVDC RESEARCH CENTRE, INC. *PSCAD User's Guide*. Manitoba - Canada, 2005.
- MARTINEZ, J. A.; DURBAK, D. W. Parameter Determination for Modeling Systems Transients - Part V: Surge Arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 3, p. 2073–2078, July 2005.
- MEISTER, A.; OLIVEIRA, M. A. G. Comparação da Representação de Modelos de Varistores de Óxido de Zinco no Programa ATP para Proteção contra Sobretensões. In: SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Paraná - Brasil, 2005.
- MICROTRAN POWER SYSTEM ANALYSIS CORPORATION. *Transients Analysis Program Reference Manual*. Vancouver - Canada, 1999.
- 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*. Basel - Switzerland, 1997.
- 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.
- NAIDU, S. R. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. Campina Grande, PB - Brasil: Eletrobrás/UFPB, 1985.

- NELMS, R. M.; SHEBLE, G. B.; NEWTON, S. R.; GRIGSBY, L. L. Using a Personal Computer to Teach Power System Transients. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 4, n. 3, p. 1293–1297, August 1989.
- NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. *Numerical Optimization*. New York, USA: Springer, 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.
- POWER SYSTEMS INSTRUMENTATION AND MEASUREMENTS COMMITTEE. *IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing*. New York, NY - USA, 1995.
- PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. New York, USA: Cambridge University Press, 1992.
- RAO, S. S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. New York, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 1996.
- SCHMIDT, W.; MEPPPELINK, J.; RITCHER, B.; FESER, K.; KEHL, L.; QIU, D. Behavior of MO-Surge Arrester Blocks to Fast Transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 292–300, January 1989.
- SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, R. A. *Probability and Statistics*. New York, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.
- THE MATHWORKS, INC. *Curve Fitting Toolbox User's Guide*. [S.l.], 2007.
- VILELA, T.; COSTA, E. G.; NERI, M. G. G.; MAIA, M. J. A. A Simple Open Source Data Acquisition System Based on MATLAB for Tektronix TDS Series Oscilloscopes. In: ISH - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Beijing - China, 2005.



ZANETTA Jr., L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. São Paulo, SP - Brasil: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

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.