



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PABLO BEZERRA VILAR

MODELAGEM MATEMÁTICA DE VARISTORES DE ZNO

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2013

PABLO BEZERRA VILAR

# MODELAGEM MATEMÁTICA DE VARISTORES DE ZNO

*Dissertação de mestrado submetida à  
Coordenação de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal  
de Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa, D.sc.

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2013

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio técnico e pessoal fornecido por várias pessoas, venho aqui os agradecer da melhor forma que puder a essas pessoas.

Agradeço a Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF e ao Eng. Marcelo Maia que proveram apoio fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores Edson Guedes e George Rossany, é difícil dizer se foram mais importantes de forma técnica ou pessoal, o que é certo é que sem eles este trabalho não existiria.

Ao professor Tarso Vilela, o homem que me ensinou o que é ser um pesquisador, sendo meu amigo e orientador há anos.

Aos alunos de graduação José Fidélis, Luiz Augusto, Wellington Silva, Raphael Nóbrega, Gabriel Vidal, Luan Castro, Ramon Dias. Graças à ajuda destes alunos, que abdicaram de férias e feriados, foi possível finalizar este trabalho em tempo hábil.

Aos amigos do laboratório, Diego Buriti, Felipe Lucena, Jalberth Fernandes, Valdemir Brito, Maria Alice e novamente Tarso Vilela, nossas piadas e aventuras fizeram do metrado uma experiência única.

Aos meus amigos Ayslan, Diego, Gregory, Nustenil, Roberto, Vágner, Victor (vulgo vitrola), Vinícius e Tiago. Perdi inúmeras horas de trabalho tomando café e conversando com essas pessoas, suspeito que se não as tivesse perdido, o trabalho perderia a maior parte de sua qualidade.

Aos meus pais, Sanção e Marinalva Vilar, pessoas únicas em todos os aspectos, devo a eles todas as minhas qualidades, os defeitos aprendi sozinho. Quando for pai, tudo que quero é ser para meu filho o que eles são para mim.

Agradeço a Bruna, minha noiva e futura esposa. Acho que nunca vou descobrir o que fiz para merecer uma pessoa como ela, o que sei é que tudo que eu sou e tudo que eu fiz, incluindo este trabalho, tem sentido graças a ela.

Finalmente, agradeço a Deus por sua enorme generosidade comigo e por ter me apresentado a todas essas pessoas.

*“Do fundo desta noite que persiste  
A me envolver em breu - eterno e espesso,  
A qualquer deus - se algum acaso existe,  
Por mi'alma insubjugável agradeço.*

*Nas garras do destino e seus estragos,  
Sob os golpes que o acaso atira e acerta,  
Nunca me lamentei - e ainda trago  
Minha cabeça - embora em sangue - ereta.*

*Além deste oceano de lamúria,  
Somente o Horror das trevas se divisa;  
Porém o tempo, a consumir-se em fúria,  
Não me amedronta, nem me martiriza.*

*Por ser estreita a senda - eu não declino,  
Nem por pesada a mão que o mundo espalma;  
Eu sou dono e senhor de meu destino;  
Eu sou o comandante de minha alma.”*

Invictus

William Ernest Henley

## RESUMO

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo matemático capaz de representar o comportamento dinâmico de um varistor de óxido de zinco. Para isso, empregaram-se técnicas de identificação de sistemas que propõem um modelo que determina a relação de causa e efeito entre um impulso de corrente e a forma de onda da tensão em um varistor de óxido de zinco, sem necessariamente atribuir significado físico aos seus parâmetros. Para desenvolver e validar o modelo matemático proposto, uma base de dados foi construída com a resposta de diferentes amostras de varistores a sinais de impulsos de corrente com diferentes amplitudes e tempos de frente. A determinação dos parâmetros do modelo é realizada apenas a partir dos sinais padronizados 8/20 e 4/10  $\mu\text{s}$ , sendo o último utilizado apenas para melhorar a precisão na determinação do valor de pico da resposta. Os sinais com tempos de frente diferentes de 8 e 4  $\mu\text{s}$  presentes na base dados, foram utilizados somente para validação do modelo proposto. Posteriormente, alguns dos modelos existentes para o comportamento dinâmico de um varistor foram aplicados à base de dados desenvolvida neste trabalho. O modelo matemático proposto foi capaz de representar o comportamento do varistor em todos os casos, sendo capaz de determinar a tensão residual do varistor com precisão igual ou maior a dos modelos existentes, e sendo sempre, uma melhor representação da forma de onda em todos os casos analisados.

**Palavras-Chave:** Para-raios, Modelo Dinâmico, Identificação de Sistemas, Impulso de Corrente, Estrutura NARX.

## ABSTRACT

This work aimed to develop a mathematical model capable of representing the dynamic behavior of a zinc oxide varistor. To achieve such goal, system identification techniques were employed to propose a model that is able to determine the relation of cause and effect between a current impulse and the waveform of the voltage across a zinc oxide varistor, not necessarily giving physical meaning to the parameters of the model. To develop and validate the proposed mathematical model, a database was built with the responses of different varistor samples to current impulses with different amplitudes and front times. The parameter determination of the proposed model was realized with the standard 8/20 and 4/10  $\mu\text{s}$  impulses, and the last was used only to improve the precision on the determination of the residual voltage. Some of the existing models of the dynamic behavior of a varistor were applied to the database developed at this work. The proposed mathematical model was capable of representing the behavior of the varistor with precision better or as good as the existing models in the determination of the residual voltage and was better in the representation of the waveform in all analyzed cases.

**Keywords:** Surge Arresters, Dynamic model, System identification, Current Impulses, NARX Structure.

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	9
1.1	Objetivos.....	10
1.2	Estrutura do trabalho.....	10
2	Para-raios de óxido de zinco.....	12
2.1	Introdução.....	12
2.2	Curva $VxI$ de para-raios.....	13
2.3	Modelos elétricos de para-raios.....	14
2.3.1	Modelo Convencional.....	14
2.3.2	Modelo proposto por Tominaga <i>et al</i> .....	15
2.3.3	Modelos propostos por Schmidt <i>et al</i> e Hileman <i>et al</i> .....	15
2.3.4	Modelo IEEE.....	16
2.3.5	Modelo proposto por Kim <i>et al</i> .....	17
2.3.6	Modelos propostos por Pinceti <i>et al</i> , Fernandez & Diaz e Magro <i>et al</i> .....	18
2.3.7	Otimizações de modelos propostos.....	19
2.3.8	Modelos matemáticos de para-raios.....	20
2.4	Considerações gerais.....	21
3	Modelagem matemática e identificação de sistemas.....	23
3.1	Introdução.....	23
3.2	Procedimento de identificação de sistemas.....	24
3.2.1	Escolha dos sinais de entrada e saída do modelo.....	25
3.2.2	Escolha do sinal de entrada.....	25
3.2.3	Detecção de estrutura.....	26
3.2.3.1	Escolha da arquitetura do modelo.....	26
3.2.3.2	Escolha da representação dinâmica a ser utilizada.....	27
3.2.3.2.1	NARMAX e NARX.....	28
3.2.3.3	Escolha da ordem, estrutura e complexidade do modelo.....	29
3.2.3.4	Determinação dos parâmetros.....	30
3.2.4	Validação do modelo.....	30
3.3	Considerações gerais.....	31
4	Metodologia e Resultados experimentais.....	33
4.1	Introdução.....	33
4.2	Ensaio de impulso de corrente.....	34
4.2.1	Material e Método.....	35
4.2.2	Procedimento experimental.....	36
4.2.3	Análise dos resultados.....	37

4.3	Caracterização de varistores.....	42
4.3.1	Material e Método .....	43
4.3.2	Procedimento experimental .....	43
4.3.3	Análise dos resultados .....	45
4.4	Considerações gerais.....	47
5	Modelo matemático de um varistor de ZnO .....	49
5.1	Introdução .....	49
5.2	Modelo caixa-Preta .....	50
5.3	Aprimoramento do modelo .....	54
5.3.1	Flexibilização do modelo.....	54
5.3.2	Exclusão de regressores espúrios.....	55
5.3.3	Uso de informação auxiliar.....	56
5.4	Validação do modelo NARX .....	58
5.5	Considerações gerais.....	65
6	Análise aprofundada do modelo NARX.....	67
6.1	Introdução .....	67
6.2	Desempenho dos modelos tradicionais .....	67
6.3	Análise dos parâmetros do modelo NARX .....	73
6.4	Considerações gerais.....	75
7	Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.....	78
7.1	Conclusões .....	78
7.2	Perspectivas de trabalhos futuros.....	80
	Referências Bibliográficas.....	82



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Os para-raios são comumente utilizados como equipamentos de proteção contra sobretensões em sistemas elétricos. A sua capacidade de proteção advém de blocos varistores, atualmente este bloco a maioria dos para-raios emprega óxido de zinco na construção dos blocos, as quais se comportam como uma elevada resistência elétrica para tensão no nível normal e como uma resistência baixa na ocorrência de surtos.

O correto dimensionamento dos para-raios que serão utilizados em um determinado sistema elétrico é fundamental em diversos estudos, como: seleção de níveis de tensão, capacidade de absorção de energia, coordenação de isolamentos e confiabilidade do sistema. Estudos como os citados são fortemente ligados a simulações, portanto, são dependentes da existência de um modelo adequado de um para-raios.

As referências bibliográficas, sobre a modelagem de varistores, mostram que o processo de modelagem, que vem sendo utilizado, consiste em propor um circuito elétrico cuja resposta seja semelhante à resposta do equipamento a determinados sinais normatizados. Os parâmetros destes modelos são determinados com base em ensaios ou, quando não é tecnicamente viável realizar ensaios, curvas características providas por referências ou fabricantes.

Apesar da metodologia convencional de modelagem ser de fato viável para construção de um modelo de varistor, seu resultado apresenta uma boa precisão apenas na resposta de impulsos específicos, além disso, muitas vezes o bom resultado diz respeito apenas ao valor de pico da resposta. Posteriormente, as características individuais dos principais modelos existentes serão discutidas neste trabalho.

Apesar dos trabalhos que se dedicam a modelagem de varistores terem empregado majoritariamente a mesma abordagem para a construção do modelo, existem diversas outras metodologias que podem ser utilizadas. O estudo do conjunto das técnicas matemáticas utilizadas para construir e analisar modelos é chamado identificação de sistemas.

Assim, este trabalho buscará desenvolver um modelo de varistor que apresente uma precisão adequada, porém, sem apresentar as limitações dos modelos existentes. Para isso serão utilizadas técnicas consolidadas de identificação de sistemas e estimação de parâmetros.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo, ou família de modelos interconectados, que consolide uma representação de um varistor de óxido de zinco que seja válida em uma larga faixa de amplitudes e tempos de frente. O desenvolvimento será baseado em técnicas de identificação de sistemas que buscarão caracterizar o varistor a partir da análise de uma base de dados a ser construída.

Como objetivos específicos citam-se:

- Realização de ensaios de impulso de corrente e aplicação de tensão senoidal em blocos varistores de óxido de zinco, visando a formação de uma base de dados que contenha as informações necessárias para desenvolvimento e validação de modelos;
- Seleção de informações, previamente conhecidas ou observadas durante os ensaios, que possam melhorar o desempenho de modelos dinâmicos de um varistor.
- Desenvolvimento de um modelo cujos parâmetros possam ser identificados apenas a partir de informações básicas e ensaios de rotina;
- Comparação do desempenho dos modelos desenvolvidos neste trabalho com os modelos comumente utilizados de varistores;

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em sete capítulos que devem embasar o tema do trabalho e apresentar a sua contribuição.

No Capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica à cerca de para-raios de óxido de zinco, com ênfase na evolução dos modelos tradicionalmente utilizados para descrever seu funcionamento.

O Capítulo 3 fornece um embasamento teórico básico na área de identificação de sistemas, sendo apresentados apenas conceitos consolidados à cerca de identificação de sistemas para facilitar a compreensão do trabalho. A abordagem adotada se justifica porque o objetivo do trabalho é propor um modelo e não uma técnica de modelagem.

Tanto os estudos de para-raios quanto identificação de sistemas são temas muito vastos para serem totalmente descritos, de modo que a revisão bibliográfica apresentada nos Capítulos 2 e 3 está centrada na área de interesse desta dissertação.

Os procedimentos experimentais aplicados na obtenção de todos os dados utilizados estão descritos no Capítulo 4, onde também é realizada uma análise dos dados obtidos.

O Capítulo 5 apresenta o desenvolvimento e validação de um modelo para os varistores estudados. Os modelos apresentados no Capítulo 5 são avaliados no Capítulo 6 através de comparações com os modelos tradicionais.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões desta dissertação e propostas de trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

#### 2.1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos de instalações elétricas de alta tensão são suscetíveis a diferentes tipos de sobretensões durante sua operação. Naturalmente, tais equipamentos precisam suportar estas sobretensões, contudo, elevar o nível de isolamento dos equipamentos, para que possam suportar sobretensões rápidas, como descargas atmosféricas, elevaria demasiadamente o custo dos equipamentos. A alternativa é utilizar equipamentos de proteção que possam limitar as sobretensões. Neste contexto, os para-raios se mostram fundamentais, sendo parte indispensável da coordenação de isolamentos do sistema. Na Fig. 2.1 é possível verificar o efeito dos para-raios nos níveis de tensão em um sistema elétrico de alta tensão.

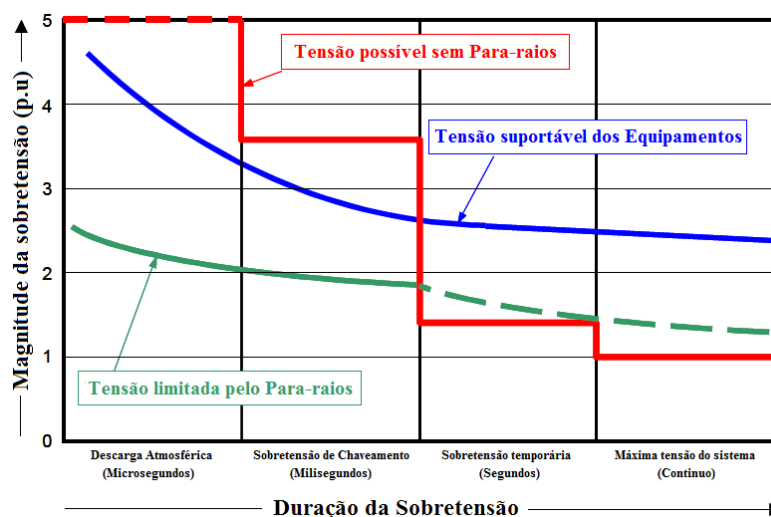


Fig. 2.1: Representação esquemática das tensões e sobretensões em um sistema elétrico de alta tensão em função da duração das sobretensões (HINRICHSEN, 2001).

Atualmente, a grande maioria dos para-raios emprega óxidos metálicos, onde se destaca o óxido de zinco, para promover uma resposta não linear em função do nível de tensão aplicada, de modo que para os níveis de tensão normal do sistema elétrico o para-

raios se comporta como uma elevada resistência e na ocorrência de sobretensões ele se comporta como uma baixa resistência, absorvendo parte da energia do surto.

## 2.2 CURVA $VxI$ DE PARA-RAIOS

Na Fig.2.2 é apresentado um exemplo de uma curva tensão x corrente, referida usualmente como curva  $VxI$ , de um para-raios de óxido de zinco, bem como ressalta alguns pontos relevantes que serão descritos a seguir.

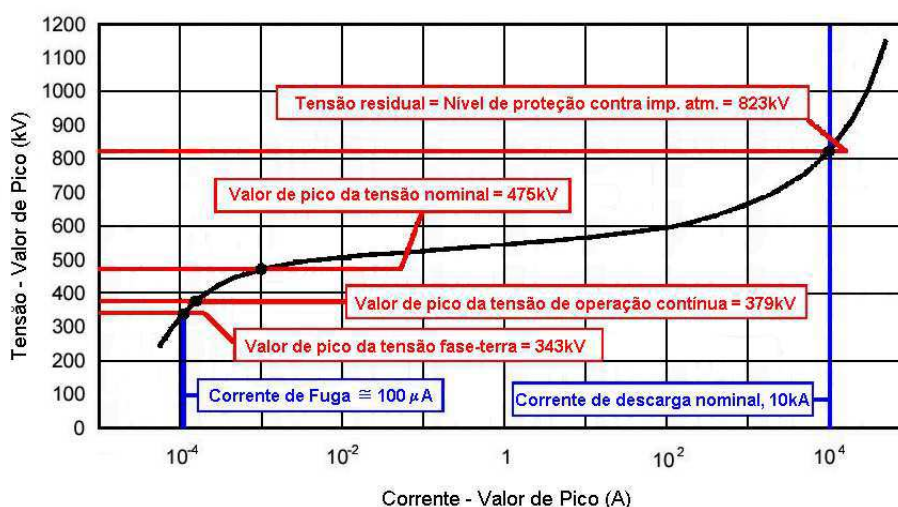


Fig. 2.2: Curva característica de um para-raios ZnO de 420 kV (HINRICHSEN, 2001).

A primeira parte da curva apresentada na Fig. 2.2 corresponde à região de baixa corrente, onde a corrente elétrica, no caso apresentado na figura, pode atingir até 0,75 mA. Na figura está representada apenas a componente resistiva da corrente que é da ordem de dezenas a centenas de microampères (HINRICHSEN, 2001).

O valor de pico da tensão fase-terra indicado na Fig. 2.2 corresponde ao valor de pico da tensão normalmente aplicada diretamente ao para-raios em um sistema de 420 kV.

O próximo ponto de interesse na curva  $VxI$  é a máxima tensão de operação contínua (MCOV, do inglês, *maximum continuous operating voltage*), que corresponde ao máximo valor eficaz de tensão que pode ser aplicado ao para-raios sem restrições (IEEE, 2005). Na literatura é comum se referir a este valor através do símbolo  $U_c$ .

A tensão nominal, usualmente simbolizada por  $U_r$ , de um para-raios, ao contrario da maioria dos equipamentos, não corresponde à tensão para qual o para-raios foi projetado para operar continuamente. Em um para-raios, a tensão nominal

caracteriza a capacidade do equipamento de lidar com sobretensões temporárias. Este nível de tensão só deve ser aplicada por um intervalo curto de tempo, em geral 10 segundos embora alguns fabricantes indiquem até 100 segundos. Durante a aplicação da tensão nominal, a corrente resistiva do para-raios não deve superar um determinado valor, específico de cada para-raios, pois, sob determinadas circunstâncias, isto pode levar a instabilidade térmica do equipamento (HINRICHSEN, 2001).

Na região de correntes superiores a 100 A, a principal grandeza de interesse do varistor é o nível de proteção contra impulsos, que corresponde ao valor de pico da tensão residual que surge no para-raios quando por ele passa a corrente de descarga nominal, que corresponde a uma corrente impulsiva com forma de onda e amplitude normalizadas.

## 2.3 MODELOS ELÉTRICOS DE PARA-RAIOS

A seguir, serão discutidos os principais modelos elétricos desenvolvidos para representar a resposta de um para-raios a impulsos rápidos.

Neste trabalho, optou-se por utilizar a expressão “modelos tradicionais” para se referir ao conjunto de modelos desenvolvidos até o presente e descritos aqui no Capítulo 2.

### 2.3.1 MODELO CONVENCIONAL

Devido a sua característica de funcionamento, os primeiros modelos dos para-raios o caracterizam como uma resistência não linear que se reduzia drasticamente em função da tensão aplicada, tal representação passou a ser conhecida como modelo convencional.

Atualmente, os programas de simulação de transitórios eletromagnéticos que utilizam este modelo empregam a Eq. 2.1 como representação da não linearidade (DOMMEL, 1996).

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

Na Eq. 2.1, os parâmetros  $i$  e  $v$  são a corrente e a tensão no para-raios, respectivamente,  $q$  é o expoente,  $p$  o multiplicador para cada segmento, porém o uso de múltiplos segmentos pode levar a problemas de convergência, e  $V_{ref}$  é uma tensão de referência arbitrária que normaliza a equação e previne problemas de representação numérica durante a potenciação.

O modelo descrito na Eq. 2.1 apresenta um bom desempenho na representação da resposta a impulsos lentos, contudo, estudos indicaram que na ocorrência de transitórios rápidos, a tensão residual pode ser afetada pela forma de onda da descarga que incide no varistor. Foram observadas elevações de até 6% no valor de pico da tensão residual em consequência de uma redução no tempo de frente de 8 para 1,3  $\mu$ s (SCHMIDT, MEPPÉLINK, *et al.*, 1989).

A variação da tensão residual em consequência de uma variação do tempo de frente da corrente incidente caracteriza um comportamento dinâmico do para-raios que não pode ser representado pelo modelo convencional. Portanto, o uso do modelo convencional em estudos de transitórios rápidos é desaconselhável.

### 2.3.2 MODELO PROPOSTO POR TOMINAGA *ET AL*

Tominaga *et al.* (1979) propuseram um primeiro modelo para contemplar a característica dinâmica do para-raios. A ideia por trás deste trabalho é representar o efeito da histerese presente no trabalho devido a sua característica dinâmica através da histerese de um circuito indutivo, assim, os autores utilizavam uma indutância em série com uma resistência não linear como estrutura para o modelo. Tal modelo obteve sucesso em testes particulares, contudo, observa-se que uma indutância de valor fixo não pode representar todas as condições de operação (TOMINAGA, AZUMI, *et al.*, 1979).

### 2.3.3 MODELOS PROPOSTOS POR SCHMIDT *ET AL* E HILEMAN *ET AL*

Schmidt *et al.* (1989) propuseram o circuito equivalente de para-raios de ZnO mostrado na Fig. 2.3. No trabalho, eles buscam uma analogia entre o circuito-modelo e a estrutura do varistor, de modo que os elementos R e L são atribuídos aos grãos de ZnO, enquanto os outros elementos estão relacionados com contorno de grãos.

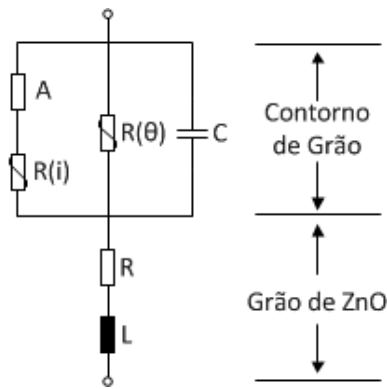


Fig. 2.3: Modelo proposto por Schmidt et al. (1989).

Quando os parâmetros são determinados de forma correta o modelo apresenta bons resultados, sobretudo na determinação do valor de pico da tensão residual. Contudo, a determinação dos parâmetros do modelo apresentado na Fig. 2.3 é dependente de curvas padronizadas, condições ambiente e dados providos pelo trabalho de outros pesquisadores ou fabricantes.

No ano seguinte, Hileman et al. (1990) propuseram uma simplificação do modelo de Schmidt et al. (1989), que mais tarde ficaria conhecido como modelo do *Cigré* e está apresentado na Fig. 2.4. O desempenho e as características deste modelo são similares às do modelo apresentado na Fig. 2.3, mas a determinação dos seus parâmetros é mais simples (HILEMAN *et al.*, 1990).

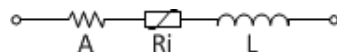


Fig. 2.4: Modelo proposto por Hileman et al. (1990).

#### 2.3.4 MODELO IEEE

O modelo do IEEE proposto pelo grupo de trabalho IEEE W. G. 3.4.11 (1992), formado em 1971 pelo comitê de equipamentos de proteção contra faltas do IEEE pode ser visto na Fig. 2.5. Neste modelo, a característica não linear V-I do para-raios é obtida pelas duas resistências não lineares  $A_0$  e  $A_1$ . O filtro R-L entre as duas resistências não lineares é responsável por gerar o efeito dinâmico do modelo.



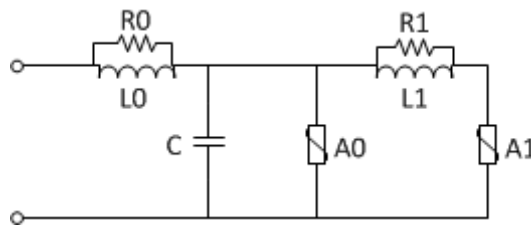


Fig. 2.5: Modelo proposto pelo IEEE W. G. 3.4.11 (1992).

O modelo apresentado na Fig. 2.5 buscou uma analogia entre os elementos do circuito e características físicas do para-raios, de modo que a indutância  $L_0$  representa a indutância associada a campos magnéticos nas imediações do para-raios, a capacitância  $C$  simula o efeito capacitivo do para-raios e a resistência  $R_0$  é usada para evitar instabilidade numérica durante a execução do modelo.

A partir das dimensões físicas do para-raios, algumas fórmulas foram propostas para calcular  $L_0$ ,  $R_0$ ,  $C$  e  $R_1$  (IEEE 3.4.11, 1992). O parâmetro  $L_1$  tem maior influência no resultado e uma fórmula a partir das dimensões físicas do equipamento também é sugerida.

O modelo proposto pelo IEEE apresenta bons resultados em termos de valores de pico, para transitórios com tempo de frente de  $0,5 \mu\text{s}$  a  $45 \mu\text{s}$ . Contudo, verifica-se uma queda de tensão inesperada na cauda da curva de tensão, onde a forma de onda produzida pelo modelo às vezes é bastante discordante da forma de onda de tensão obtida experimentalmente (BAYADI *et al.*, 2003).

### 2.3.5 MODELO PROPOSTO POR KIM ET AL

KIM *et al.* (1996) propuseram um modelo que consistia em uma resistência não linear em série com uma indutância não linear introduzida para produzir o efeito dinâmico do para-raios. Este modelo foi construído a partir da curva  $VxI$  do impulso de onda 8/20  $\mu\text{s}$  e da taxa de aumento da frente de onda da tensão para o impulso padrão (KIM *et al.*, 1996). O modelo proposto tem uma boa resposta para impulsos de frente rápida, apresentando erros menores que 1% na determinação do valor de pico da tensão residual. Entretanto, para impulsos de corrente com tempos de frente maiores que  $4 \mu\text{s}$  não se constata os mesmos bons resultados. Conclui-se, portanto, que o modelo é útil apenas nas simulações com impulsos de frente rápida.

### 2.3.6 MODELOS PROPOSTOS POR PINCETI ET AL, FERNANDEZ & DIAZ E MAGRO *ET AL*

Pinceti et al. (1999) propuseram uma simplificação do modelo do IEEE, com pequenas modificações. Observando o modelo na Fig. 2.6, verifica-se que as resistências  $R_1$  e  $R_0$  foram substituídas pela resistência  $R$ , a qual tem a finalidade de evitar problemas numéricos, e a capacitância  $C$  foi eliminada devido ao pouco efeito sobre o comportamento do modelo (PINCETI e GIANNETTONI, 1999). O modo de funcionamento deste modelo é bastante similar ao proposto pelo IEEE.

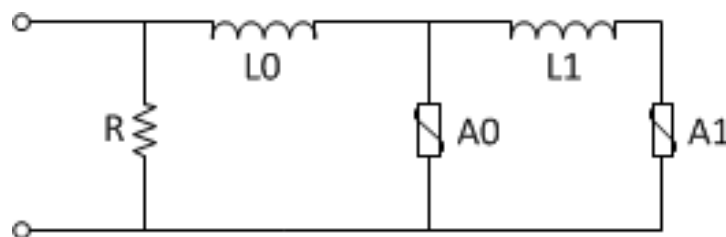


Fig. 2.6: Modelo proposto por Pinceti et al. (1999).

A principal vantagem do modelo proposto é a sua fácil determinação dos parâmetros. Os critérios propostos levam em consideração apenas as características elétricas do para-raios e não é necessário o uso de processos iterativos. Segundo os autores, o modelo apresenta erros inferiores a 4,5% na determinação do valor de pico da tensão residual para transitórios com tempo de crescimento de  $1 \mu\text{s}$  a  $30 \mu\text{s}$ . Contudo, da mesma forma que no modelo IEEE, verifica-se uma queda de tensão inesperada na cauda da curva de tensão, onde a forma de onda produzida pelo modelo, às vezes, é bastante discordante da forma de onda de tensão obtida experimentalmente (BAYADI *et al.*, 2003).

O modelo proposto por Fernandez & Diaz (2001) é outra simplificação do modelo proposto pelo IEEE e pode ser visto na Fig. 2.7. No modelo, em comparação com o modelo do IEEE,  $R_0$  e  $L_0$  foram descartados, restando apenas a indutância  $L_1$  entre as resistências não lineares  $A_0$  e  $A_1$ . No modelo,  $C$  representa a capacitância terminal-terminal do para-raios, e a resistência  $R$ , em paralelo com  $A_0$ , destina-se a evitar as oscilações numéricas. A determinação dos parâmetros do modelo possui muitos passos na determinação de  $A_0$  e  $A_1$  e, principalmente, de  $L_1$ .

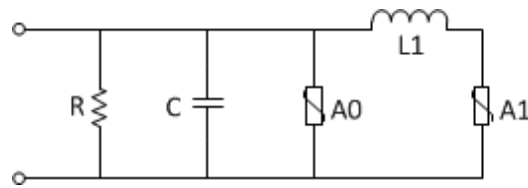


Fig. 2.7: Modelo proposto por Fernandez & Diaz (2001).

Algumas vantagens do modelo é que todos os dados necessários podem ser encontrados no catálogo do fabricante ou, alternativamente, nas medições experimentais, e o mecanismo de ajuste é simples e não há necessidade de cálculos iterativos. Para correntes de frente rápida com tempos de frente de  $1 \mu\text{s}$  a  $8 \mu\text{s}$ , o modelo tem um erro máximo de 1,7% no pico da tensão (FERNÁNDEZ e DÍAZ, 2001). No entanto, em algumas simulações este modelo apresentou picos (BAYADI *et al.*, 2003).

A partir do modelo apresentado na Fig. 2.6, Magro et al.(2004) propuseram um novo método para determinação dos parâmetros. Segundo os autores, o modelo de Pinceti apresenta pouca precisão para diversos para-raios de média tensão. Além disso, a determinação dos parâmetros do modelo de Pinceti apresenta como dificuldade a indisponibilidade dos dados necessários para calcular os parâmetros dinâmicos do modelo, por que, muitas vezes, o fabricante não declara a tensão residual de pulso íngreme (com um tempo de subida entre  $0,5$  e  $1 \mu\text{s}$ ). A fim de contornar o problema, Magro *et. al* propuseram um método para determinar os parâmetros  $L_0$  e  $L_1$  que não depende da tensão residual de pulso íngreme e que apresenta uma boa precisão para para-raios de alta e média tensão. Contudo, este modelo apresenta as mesmas limitações do modelo Pinceti e IEEE, ou seja, é uma boa representação apenas do valor de pico da forma de onda de tensão.

### 2.3.7 OTIMIZAÇÕES DE MODELOS PROPOSTOS

Li et al. (2002) propuseram uma técnica numérica de estimação paramétrica para modelos de para-raios de óxido de zinco. Os parâmetros dos modelos foram ajustados a partir dos valores de tensão residual medidos, após a injeção de um impulso de corrente em um conjunto de para-raios. Os melhores resultados foram obtidos quando se utilizou o modelo proposto pelo IEEE em conjunto com a técnica de otimização proposta pelos autores, mesmo assim, ainda foram obtidos erros em torno de 10%, para o ajuste da forma de onda da tensão no para-raios.

Lira (2008) propôs outra abordagem para melhorar a seleção dos parâmetros dos modelos dinâmicos de para-raios, realizando um ajuste da resposta do varistor com base na resposta de ensaios. Os resultados obtidos com esta abordagem superaram aqueles obtidos com os procedimentos tradicionais de modelagem.

Karbalaye et al. (2009) propuseram um método de ajuste dos parâmetros para o modelo apresentado na Fig. 2.7. Conforme explicado pelos autores, os resistores não lineares  $A_0$  e  $A_1$  são definidos conforme sugerido pelo IEEE e os elementos  $L_1$  e  $C_1$  são ajustados com um algoritmo proposto. As equações assemelham-se bastante com as equações propostas por Pinceti *et al.* (1999) para cálculo da indutância  $L_1$ , diferindo pelo termo exponencial e pelas constantes racionais. Conforme afirmado pelos autores, esse novo modelo apresentou resultados bastante satisfatórios para simular surtos de corrente de curta duração. O modelo proposto apresentou pequenos valores de erro no valor de pico da tensão residual.

No mesmo ano, Chistodoulou et al. (2009) apresentaram um algoritmo de otimização de parâmetros baseado no método *downhill simplex*. O algoritmo apresentado não é exclusivo para um determinado modelo, tanto é que o mesmo foi aplicado aos modelos dependentes da frequência mais bem aceitos (IEEE W. G. 3.4.11, 1992; PINCETI et al., 1999; FERNANDEZ & DIAZ, 2001), obtendo-se uma redução dos erros em quase 50% quando comparados com os métodos de ajuste de parâmetros convencionais dos respectivos modelos. Após a aplicação do algoritmo, o modelo que apresentou menor erro foi o proposto pelo IEEE W. G. 3.4.11 (1992).

Os métodos de otimização da seleção de parâmetros obtiveram sucesso em melhorar o desempenho dos modelos dinâmicos existentes mas não solucionam as suas limitações, uma vez que utilizam a mesma estrutura para a modelagem.

### 2.3.8 MODELOS MATEMÁTICOS DE PARA-RAIOS

Zhu & Raghuveer (1999) realizaram uma representação matemática da região de baixa corrente do para-raios. Foram utilizadas duas equações polinomiais de quinto grau na representação, obtendo uma boa precisão em relação a dados experimentais providos por suas referências bibliográficas. No entanto, existe uma descontinuidade na transição de uma equação para a outra. A transição pode gerar imprecisões ou problemas de convergência em programas numéricos (ZHU e RAGHUVVEER, 1999).

Em sua tese, SILVEIRA (2009) propõe um modelo baseado na equação de Langevin. Tal modelo ajusta-se bem aos dados experimentais sem utilizar múltiplas equações, eliminando assim os problemas mencionados anteriormente.

Apesar de empregar equações para realização da modelagem de para-raios, estes trabalhos não seguem uma metodologia formal de identificação de sistemas, além disto, estes trabalhos concentram-se apenas na região de baixa corrente do para-raios.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Foram apresentadas neste capítulo, características básicas dos para-raios para a compreensão do trabalho. Também foi apresentada uma breve revisão bibliográfica acerca das pesquisas mais relevantes na área de modelagem de para-raios.

A Tabela 2.1 sintetiza algumas informações acerca dos trabalhos discutidos nessa revisão bibliográfica.

Como ficou claro na revisão bibliográfica apresentada, a grande maioria dos trabalhos busca propor ou simplificar um circuito com base em características do para-raios.

Não foi verificado o uso formal de técnicas de identificação de sistemas, mesmo nos trabalhos que usam modelos matemáticos, e estes modelos matemáticos estavam concentrados apenas na região de baixa corrente do para-raios.

É importante salientar que a metodologia tradicional apresenta bons resultados em diversos casos, porém, todo modelo possui limitações. Portanto, é importante estudar novas abordagens de modelagem que supram as carências dos modelos atuais. Posteriormente, os modelos desenvolvidos neste trabalho serão comparados com os principais modelos apresentados neste capítulo.

Tabela 2.1: Síntese de contribuições dos trabalhos discutidos na Revisão Bibliográfica.

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Estudo do comportamento dos Varistores</b>	<b>Proposição de Modelo Dinâmico</b>	<b>Melhoria na Seleção de Parâmetros</b>	<b>Modelo Matemático</b>
Tominaga, S. <i>et al.</i>	1971		x		
Schmidt, W. <i>et al.</i>	1989	x	x		
IEEE work group	1992		x		
I. Kim <i>et al.</i>	1996		x		
Zhu, H.;	1999				x
Raghuveer, M. R.					
Pinceti, P.;	1999		x		
Giannettoni, M.					
Fernández, F.;	2001		x		
Díaz, R. Li, H. <i>et al.</i>					
Magro, M. C. <i>et al.</i>	2004			x	
Lira, G. R. S.	2008			x	
Silveira, J.	2009				x
Karbalaye, Z.	2009			x	

## CAPÍTULO 3

# MODELAGEM MATEMÁTICA E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

### 3.1 INTRODUÇÃO

Modelos são utilizados em praticamente todas as áreas do conhecimento humano para facilitar a compreensão dos fenômenos que nos cercam, desde simples modelos mentais que alguém constrói para interpretar uma determinada situação do dia a dia, até modelos complexos utilizados no estudo de ciência aplicada. Assim, o termo “modelo” é bastante vasto, sendo utilizado para designar uma grande quantidade de representações utilizadas como forma de interpretação de um dado fenômeno ou sistema.

Dentre as inúmeras formas de se construir um modelo, destaca-se a modelagem matemática, onde um dado fenômeno é descrito com base numa equação. Inúmeros são os exemplos desta categoria de modelos, uma vez que muitas das leis da física se encaixam na descrição.

A construção de modelos baseados na observação e no conhecimento acerca do fenômeno costuma ser difícil, pois na maioria dos casos não se dispõe do tempo ou recursos para obter tal conhecimento, além disso, mesmo que tal modelo venha a ser construído, sua aplicação direta é muitas vezes inviável devido à infinidade de variáveis que afetam os problemas reais.

A alternativa direta para contornar as dificuldades existentes na modelagem baseada nas leis da física é determinar uma relação de causa e efeito entre os dados de interesse sem necessariamente determinar como se dá tal relação, ou seja, sem se preocupar em dar um significado físico a equação que será utilizada como modelo. Este tipo de abordagem para construção de um modelo é chamado de identificação de sistemas ou modelagem caixa-preta, em contraste com a metodologia baseada na física do processo, que é usualmente chamada de modelagem caixa-branca.

Naturalmente, em um problema complexo, o bom senso diz que nenhuma informação deve ser deixada de lado, de modo que, quando os modelos desenvolvidos pelas abordagens citadas não são suficientes, deve-se utilizá-las em conjunto, realizando o que se intende por modelagem caixa-cinza.

Neste trabalho as técnicas de identificação de sistemas serão empregadas para modelar o comportamento de um para-raios de óxido de zinco, por sua vez, este capítulo tem o objetivo de apresentar os conceitos básicos do estudo para facilitar a compreensão do trabalho desenvolvido.

Ao longo deste capítulo, ficará cada vez mais claro que cada etapa do processo de identificação tem diferentes possibilidades de ser abordada. Muito do que se pesquisa na área tem o intuito de embasar o processo de escolha de possibilidades, mas, quase sempre o embasamento não é conclusivo, de modo que a única forma de determinar se uma possibilidade é viável é testando-a. Assim sendo, ao fim do processo de construção do modelo, o pesquisador terá colecionado mais falhas do que sucessos e dificilmente poderá concluir que as possibilidades que descartou não pudessem se tornar mais viáveis, caso alguma mudança em uma possibilidade tivesse sido feita.

Neste capítulo e nesta dissertação será apresentado o caminho que conduz ao modelo desenvolvido, e algumas possibilidades não exploradas serão mencionadas, seja para justificar o seu não uso ou para auxiliar futuros trabalhos.

## 3.2 PROCEDIMENTO DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Identificação de sistemas não é um problema de aplicação de técnicas padronizadas de uma forma específica que atinja resultados garantidos. Na verdade, devem-se observar os objetivos do modelo, as observações obtidas, as possibilidades de experimentação, o tempo e o esforço disponíveis e então, reunir um modelo baseado na união de experimentação, processamento, análise e revisão. Cada estágio do processo é incerto e a experiência indica que cada exercício de identificação levanta algum problema novo (NORTON, 1986).

Assim sendo, não há muito sentido em estabelecer um passo-a-passo para criar um modelo, no entanto, independente do caminho escolhido, alguns pontos básicos devem ser observados (NELLES, 2001):

- Escolha dos sinais de entrada e saída do modelo;



- Escolha dos sinais de excitação;
- Escolha da arquitetura do modelo;
- Escolha da representação dinâmica a ser utilizada;
- Escolha da ordem, estrutura e complexidade do modelo;
- Escolha dos parâmetros;
- Validação dos modelos.

A seguir, as características básicas serão discutidas mais detalhadamente e correlacionadas com as escolhas realizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

### 3.2.1 ESCOLHA DOS SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO

Em muitas situações a escolha das variáveis que serão utilizadas como entrada e saída é simples de ser feita, a própria aplicação do modelo desenvolvido deixa claro qual variável se deseja estimar (saída) e qual variável controla a variável de interesse (entrada). Infelizmente, nem sempre a escolha é tão fácil, por exemplo, quando o sistema a ser modelado for multivariável e houver muitas variáveis a disposição, é preciso escolher quantas e quais variáveis são mais adequadas para caracterizar o sistema.

Dentre as técnicas de seleção das variáveis candidatas, pode-se citar a decomposição em valores singulares, análise em componentes principais e funções de correlação cruzada, todavia, estas e outras técnicas só são empregadas quando o uso de conhecimentos prévios acerca do fenômeno de interesse não for suficiente para guiar a escolha das variáveis de entrada e saída.

Neste trabalho, sinais de impulso de corrente foram utilizados diretamente como entrada, enquanto que a tensão residual foi a escolha natural para variável de saída. Contudo, não se descarta a possibilidade de que a aplicação de algum processamento digital aos sinais possa melhorar o desempenho do modelo como um todo. Também, não se pode descartar a possibilidade de que existam outras variáveis que interfiram na resposta, como as condições de realização do ensaio ou o envelhecimento do varistor.

### 3.2.2 ESCOLHA DO SINAL DE ENTRADA

Os algoritmos de estimação de parâmetros, a exemplo do tradicional método dos mínimos quadrados, comumente se constituem um problema de inversão de matrizes.

Sabe-se que quanto mais constante for o sinal de entrada, mas mal condicionada será a matriz a ser invertida. Sob este aspecto, quanto mais aleatório for o sinal de entrada melhor numericamente condicionado será o problema (AGUIRRE, 2004).

O uso de sinais aleatórios implica em sinais de excitação de larga faixa de frequência. Este aspecto é ainda mais importante na identificação de sistemas não-lineares, pois o modelo produzido só representará as dinâmicas que forem excitadas. Além da necessidade do uso de uma larga faixa de frequência, sistemas não-lineares comumente precisam ser excitados em diferentes faixas de amplitude para que se possa excitar suas características estáticas e dinâmicas.

Na prática, nem sempre é possível excursionar um sistema em uma ampla faixa de operação. Em particular, no estudo de varistores, onde não é possível gerar um sinal aleatório, de amplitude variável e de alta corrente elétrica para excitar uma pastilha de óxido de zinco em uma única operação ou ensaio, a alternativa é compor uma base de dados de diversos experimentos isolados.

### 3.2.3 DETECÇÃO DE ESTRUTURA

As escolhas da arquitetura do modelo, da representação dinâmica e da estrutura e complexidade do modelo são usualmente referidas como etapa da detecção de estrutura. Esta etapa é sem dúvida a mais subjetiva do processo de criação do modelo.

#### 3.2.3.1 ESCOLHA DA ARQUITETURA DO MODELO

A arquitetura geral do modelo consiste em diversas observações prévias que devem balizar o desenvolvimento do modelo. A seguir apresenta-se uma lista, sem dúvida incompleta, dos principais tópicos que compõem a arquitetura de um modelo (NELLES, 2001), bem como, as características do modelo a ser desenvolvido:

- Tipo do problema: os mais comuns são problemas de classificação, identificação estática e dinâmica. Este trabalho é um exemplo de um problema de identificação dinâmica;
- Uso do modelo: existe uma infinidade de aplicações para modelos, como simulação, predição, otimização e controle. Os modelos desenvolvidos neste trabalho estão voltados para simulação;

- Disponibilidade e qualidade dos dados: quando os dados disponíveis são poucos ou muito ruidosos é necessário utilizar estruturas que sejam robustas, em geral abordagens globais;
- Restrições de tempo e de memória: naturalmente o tempo disponível para operação e atuação dos modelos e a memória disponível do *hardware* onde será implementado o modelo são variáveis fundamentais. Contudo, os modelos desenvolvidos neste trabalho devem operar de forma *off-line*, de tal sorte que restrições de tempo de processamento não são relevantes e os requisitos de memória são baixos;
- Experiência do usuário: o usuário final irá preferir modelos que remetam a alguma experiência anterior, mesmo que muitas vezes outra alternativa traga vantagens. Muito embora o modelo apresentado neste trabalho tenha sido desenvolvido na plataforma Matlab, buscou-se desenvolver um modelo que pudesse ser implementado no simulador ATP (*Alternative Transient Program*), tradicionalmente utilizado na análise de transitórios;
- Ferramentas disponíveis: existem cada vez mais *softwares* no mercado com funcionalidades voltadas para identificação de sistemas. A implementação de dada ferramenta em um *software* comercial tende a fazer com que ela seja mais largamente utilizada;
- Aceitação do modelo: o uso de modelagem puramente caixa-preta tende a não ser convincente. Assim, o uso de características previamente conhecidas do sistema e uma boa apresentação do procedimento de modelagem são fatores importantes. Neste trabalho buscou-se utilizar características presentes nos dados obtidos nos ensaios, para facilitar o processo de modelagem e tornar os modelos desenvolvidos mais inteligíveis.

### 3.2.3.2 ESCOLHA DA REPRESENTAÇÃO DINÂMICA A SER UTILIZADA

Como discutido nos capítulos anteriores, o objetivo deste trabalho é a criação de um modelo que represente a característica dinâmica dos para-raios. Logo, não há como contestar que se trate de um problema de identificação dinâmica e, portanto, requer o

uso de estruturas dinâmicas. Existem basicamente dois tipos de estruturas dinâmicas: a externa e a interna.

Estruturas de dinâmica interna buscam realizar a modelagem sem o conhecimento real do estado do sistema modelado. Pode-se dizer que as variáveis de estado deste tipo de modelo são artificiais e visam apenas reproduzir o comportamento dos dados. Este tipo de abordagem é preferível quando não for possível empregar conhecimentos prévios do sistema a ser modelado. Atualmente, o uso das estruturas dinâmicas internas tem crescido bastante devido ao sucesso da aplicação de redes neurais artificiais em diversos problemas complexos (NELLES, 2001).

As estruturas de dinâmica externa correspondem a estruturas onde se pode distinguir claramente um filtro dinâmico externo e uma estrutura não linear estática. Este tipo de modelagem ainda é o mais utilizado atualmente, por permitir o uso de conhecimentos prévios acerca do problema no processo de modelagem. A representação mais geral e mais utilizada de uma estrutura dinâmica externa é chamada de representação NARMAX, do inglês, *Nonlinear Autoregressive Moving Average with Exogenous Variable*.

Neste trabalho, será utilizada a representação de dinâmica externa para representar os para-raios. Uma melhor descrição da estrutura NARMAX será apresentada a seguir. É importante salientar que a escolha foi baseada em testes preliminares, realizados ao fim dos ensaios. Os testes indicaram um desempenho superior das estruturas de dinâmica externa. Todavia não se descarta a possibilidade de que a modelagem do comportamento dos varistores possa ser realizada com o uso de estruturas de dinâmica interna.

#### 3.2.3.2.1 NARMAX E NARX

A estrutura NARMAX consiste em representar discretamente a saída  $y(k)$  de um dado sistema como uma combinação não linear dos valores anteriores da saída  $y(k)$ , da entrada  $u(k)$  e do ruído  $e(k)$ .

Um caso particular da representação NARMAX é a representação NARX (*Nonlinear Autoregressive with Exogenous Variable*) onde o termo de média móvel, ruído  $e(k)$ , é considerado não significativo. Na Eq. 3.1 é apresentada a forma geral de um modelo NARX:

$$y(k) = F(y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k-\tau_d), u(k-\tau_d-1), \dots, u(k-n_u)). \quad (3.1)$$

Em que,  $\tau_d$  é o tempo morto do sistema,  $F$  é uma função não linear e  $n_y$  e  $n_u$ , são os atrasos na saída e na entrada, respectivamente. Entende-se por atraso, o maior número de amostras passadas que o modelo irá considerar na predição do valor futuro.

A primeira dificuldade que se encontra é a determinação da função não linear  $F$ , as duas representações NARX mais utilizadas, tradicionalmente, são a polinomial e a racional devido a sua simplicidade e capacidade de generalização (CHEN e BILLINGS, 1989). No entanto, a popularização dos *softwares* de identificação de sistemas vem fazendo com que essas estruturas sejam substituídas por outras mais complexas como a equação sigmóide e a transformada *wavelet* (NELLES, 2001). Existem diversos trabalhos que visam prover um embasamento para a escolha da função  $F$ , mas não há resultados conclusivos.

### 3.2.3.3 ESCOLHA DA ORDEM, ESTRUTURA E COMPLEXIDADE DO MODELO

A escolha da ordem a ser utilizada no modelo, em geral, é realizada com base em um misto de conhecimento prévio do problema e tentativa e erro. O número de termos em modelos não lineares tende a crescer em função da ordem e do número de atrasos utilizados. Essa característica é particularmente pronunciada em modelos NARMAX, podendo chegar a níveis impraticáveis, em muitos casos reais. Todavia, é possível obter representações concisas, desde que se possa escolher dentre os termos aqueles que sejam representativos na dinâmica do sistema modelado.

Neste contexto, são comuns os termos *overfitting* e *underfitting*, para designar os modelos com excesso ou falta de termos, respectivamente. Os modelos sobreparametrizados tendem a apresentar dinâmicas espúrias (AGUIRRE e BILLINGS, 1995) ou seja, dinâmicas que não fazem parte do sistema a ser modelado, enquanto modelos subparametrizados não representam todas as características do sistema. Assim, a escolha da ordem e complexidade adequadas para o modelo é fundamental a seu sucesso. Dependendo da representação escolhida para o modelo, existem diversos algoritmos e conceitos que podem ser utilizados, contudo, em muitos casos um procedimento de tentativa e erro é utilizado, sobretudo na indústria. Os motivos para a

não aplicação das técnicas de escolha de complexidade de modelo são (NELLES, 2001):

- Elevado tempo de desenvolvimento das técnicas;
- Grande número de parâmetros a ser determinado nos problemas reais;
- Pouca ou nenhuma aplicação em problemas de identificação dinâmica, sobretudo naqueles voltados para simulação, que é precisamente o caso deste trabalho;
- Pouco apoio na forma de *softwares* e *toolboxes*.

#### 3.2.3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

A determinação dos parâmetros é quase sempre a etapa mais simples do processo de construção de um modelo, uma vez que geralmente é realizada com algoritmos tradicionais adequados à estrutura escolhida. As escolhas feitas até o momento da determinação dos parâmetros ditam o algoritmo que será utilizado para este fim e, não raramente, o algoritmo já se encontra implementado em algum *software* comercial. No caso deste trabalho, para estruturas polinomiais utilizou-se o clássico algoritmo dos mínimos quadrados para determinação dos parâmetros.

#### 3.2.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Uma vez que o sistema tenha sido identificado, os modelos ou família de modelos precisam ser avaliados para averiguar se o resultado é suficientemente bom para aplicação desejada. O processo de avaliação é chamado validação.

O método de validação mais utilizado é a simulação que consiste em apresentar o modelo a um banco de dados de validação, para o qual a resposta correta já seja conhecida. É de bom alvitre que os dados utilizados na etapa de validação não tenham feito parte do processo de estimação dos parâmetros, para que se possa avaliar a capacidade de generalização do modelo.

É comum na literatura de modelagem, sobretudo em *softwares* que implementem identificação de sistemas, simular o modelo pelo método “um passo a frente”, onde o modelo prevê o próximo valor no tempo, mas não utiliza o valor predito nas próximas previsões. Devido às características matemáticas do processo de modelagem, em alguns casos, as previsões “um passo a frente” apresentam erros pequenos para modelos

inadequados, transmitindo a falsa ideia de que o modelo é válido. A solução para este problema seria a validação pelo método “infinitos passos à frente” onde nenhuma saída medida é utilizada no processo de predição.

Naturalmente, as validações “um passo a frente” e “infinitos passos a frente” são casos extremos, na maioria dos casos utiliza-se tanto dados determinados pelo modelo como dados estimados na chamada validação “ $K$ -passos a frente”, nesse caso o valor de  $K$  depende da aplicação do modelo.

Neste trabalho os modelos desenvolvidos devem funcionar de forma *off-line*, o que indica que não se pode utilizar dados medidos tornando obrigatória a validação “infinitos passos a frente”.

Matematicamente, a simulação do modelo para uma dada base de dados não é suficiente para determinar se o modelo está polarizado. Para que um modelo não seja polarizado, os resíduos de modelagem devem ser brancos, ou seja, sua energia deve ser igualmente distribuída no espectro de interesse, e não correlacionados com a entrada. O procedimento que visa determinar se o modelo é polarizado é chamado validação estatística.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo foram apresentados conceitos acerca de identificação de sistemas, com o objetivo de facilitar a compreensão do procedimento adotado para desenvolver o modelo adequado aos varistores de óxido de zinco.

Certamente chama a atenção a grande quantidade de incertezas no processo de construção do modelo, que é agravada pela existência de etapas intimamente ligadas a processos de tentativa e erro. Contudo, é importante lembrar que os processos de tentativa e erro mencionados não consistem em testes aleatórios e sim em testes baseados nos conhecimentos prévios acerca do problema. Além disso, salienta-se que as técnicas brevemente discutidas, neste capítulo, já foram utilizadas com sucesso na modelagem de diversos problemas físicos reais (AGUIRRE, 2004).

Existem diversas outras análises que podem ser realizadas para determinação de um modelo e que não foram discutidas por não serem relevantes para o trabalho. Como exemplo, podem-se citar os testes de não linearidade realizados apenas por formalidade

e que conduziram a conclusão esperada pelo senso comum: o comportamento do varistor é não linear e deve ser modelado por uma estrutura não linear.



## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento de um modelo é fundamental que exista uma base de dados que caracterize bem o fenômeno de interesse. Além disso, o conhecimento das características do funcionamento do sistema real é fundamental para saber interpretar os dados obtidos utilizando os modelos.

Para formar a base de dados utilizada neste trabalho, foram empregadas amostras de varistores. As amostras foram obtidas a partir de um para-raios comercial novo aplicável em sistemas de subtransmissão. Na Tabela 4.1 são apresentadas algumas características do para-raios, bem como, as dimensões das pastilhas utilizadas.

*Tabela 4.1- Características dos varistores utilizados*

<b>Informações gerais</b>	Tensão nominal: 36 kV MCOV: 30,6 kV Revestimento: Polimérico Diâmetro das Pastilhas: 41,0 mm
<b>Varistor</b>	<b>Altura do Varistor (mm)</b>
G1-01	28,9
G1-02	28,3
G1-03	28,3
G1-04	28,4
G1-05	28,9
G1-06	28,2
G1-07	28,3
G1-08	28,3
G1-10	28,2

Uma fotografia das amostras de varistores utilizados é apresentada na Fig. 4.1.



Fig. 4.1: Amostras de varistores utilizadas para construir a base de dados.

A partir dos dados indicados na Tabela 4.1, sabendo que havia nove varistores no para-raios, é possível inferir que a tensão nominal e MCOV dos varistores são 4,0 e 3,4 kV, respectivamente.

Para obter os dados necessários para desenvolver os modelos utilizados, foram realizados dois tipos distintos de ensaios: de caracterização de varistores e aplicação de impulso de corrente. No presente capítulo serão discutidos os procedimentos empregados nos ensaios, bem como, os resultados obtidos.

Ao término dos ensaios apenas os varistores G1-03, G1-06, G1-07 e G1-10 continuaram intactos, os demais foram total ou parcialmente destruídos em consequência dos repetidos ensaios de impulsos a que foram submetidos.

Os ensaios foram realizados entre abril do ano 2012 e janeiro de 2013 nas dependências do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), que também proveu todas as amostras de blocos varistores utilizadas.

## 4.2 ENSAIOS DE IMPULSO DE CORRENTE

O ensaio de impulso de corrente, ou ensaio de tensão residual, consiste basicamente em aplicar uma corrente impulsiva no varistor e medir a forma de onda da tensão que surge no varistor em consequência do impulso. A seguir serão descritos o material e metodologia deste ensaio.

#### 4.2.1 MATERIAL E MÉTODO

Para a realização dos ensaios foram utilizados:

- Gerador de impulso de corrente;
- Amostras de varistores;
- Osciloscópio Agilent *infiniiVision* DSO-X 3104A;
- Ponta de prova de alta tensão Tektonix P6015A;
- Computador.

O osciloscópio é utilizado em conjunto com o computador para realizar a aquisição dos dados de tensão e corrente no varistor. No entanto, devido aos elevados níveis de tensão residual tornou-se necessário utilizar uma ponta de prova de alta tensão para reduzir os níveis de tensão na entrada do osciloscópio.

O gerador de impulso utilizado nos ensaios foi fabricado pela empresa suíça *Haefely Test Ag* e é mostrado na Fig. 4.2. Com ele é possível realizar ensaios de impulsos de corrente com diversas formas de onda e amplitudes.

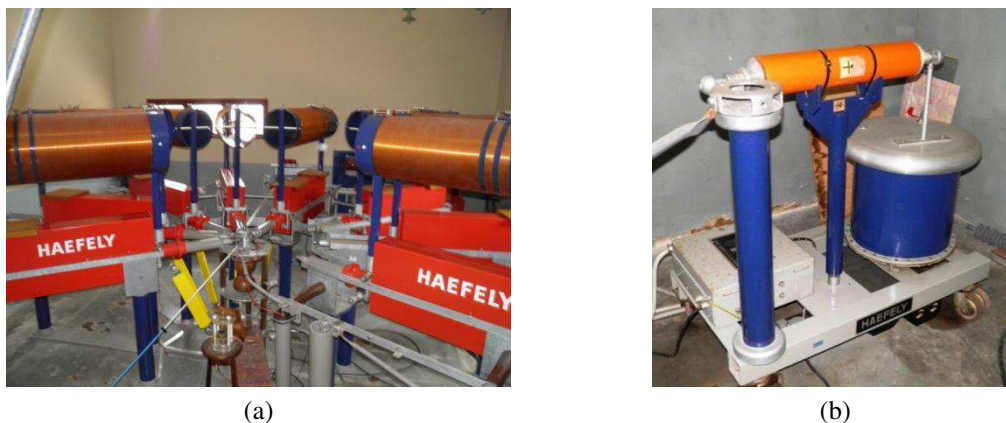


Fig. 4.2: (a) Gerador de impulso de corrente. Capacitores, indutores, resistores, espinterômetro, (b) transformador elevador e diodo retificador.

Na Fig. 4.3 é apresentado o circuito elétrico do gerador de impulso de corrente. Para aplicação de um impulso, a tensão do transformador é utilizada para carregar o capacitor  $C$ , posteriormente, um mecanismo controlado a distância, aproxima lentamente as esferas do *gap SG*, quando a distância for suficientemente pequena formar-se-á um arco que permitirá o descarregamento do capacitor sobre o varistor. A forma de onda do descarregamento será determinada pelos valores de  $R$ ,  $L$ ,  $C$  e pelo próprio varistor. A tensão residual é obtida diretamente sobre o varistor, enquanto, a corrente aplicada é obtida através do resistor *shunt*.

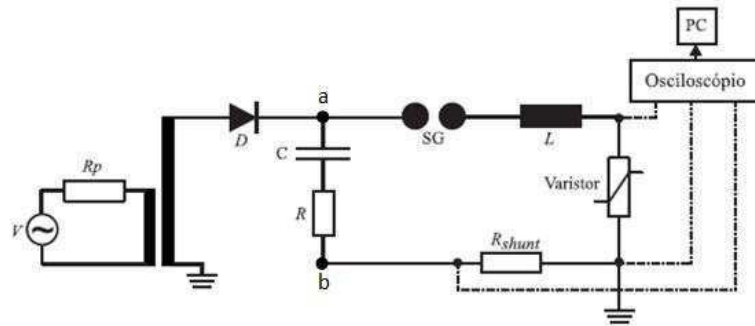


Fig. 4.3: Circuito elétrico do gerador de impulso de corrente.

Cada capacitor do gerador de impulso apresenta uma capacitância de  $2,0 \mu\text{F}$ , o indutor utilizado pode ser de  $0,885$  ou  $5,700 \mu\text{H}$ , o resistor *shunt* pode ser de  $5,488$  ou  $10,540 \text{ m}\Omega$  e os resistores  $R$  podem ser de  $2,3$ ;  $2,4$ ;  $5,0$ ;  $6,3$ ;  $16,3$  e  $200,0 \Omega$ .

#### 4.2.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados ensaios com impulsos de seis formas de onda distintas, a amplitude dos impulsos variou de  $2$  a  $10 \text{ kA}$  com passo de  $2 \text{ kA}$ . Cada impulso (forma de onda) foi aplicado duas vezes para verificar se havia discrepâncias significativas na resposta, porém em nenhum momento isso foi observado.

Na Tabela 4.2 estão apresentados os tempos de frente e de cauda, bem como, os valores dos componentes utilizados no gerador de impulso para proporcionar as formas de onda requeridas.

Não existe referência que possa prover um método de realizar as ligações no gerador de impulso para atingir uma forma de onda desejada com boa precisão, assim foram realizados múltiplos testes até obter as configurações indicadas na Tabela 4.2. Os impulsos tipo II e V foram escolhidos por se tratar de valores padronizados e comuns em diversas referências bibliográficas. Por sua vez, os demais impulsos foram escolhidos para caracterizar a resposta do varistor para diferentes tempos de frente.

Para os impulsos do tipo I, III, IV e V só foi possível atingir o valor de  $8 \text{ kA}$  devido a limitações do transformador e do gerador de impulso, logo, apenas para os ensaios tipo II e VI foi possível atingir  $10 \text{ kA}$ .

Tabela 4.2: Características dos impulsos aplicadas aos varistores e do circuito utilizado para gerá-los

<b>Impulso</b>	<b>Tempo de frente (<math>\mu\text{s}</math>)</b>	<b>Tempo de cauda (<math>\mu\text{s}</math>)</b>	<b>Número de estágios</b>	<b>Resistores (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Indutor (<math>\mu\text{H}</math>)</b>
Tipo I	9,0	23	5	2,4	5,7
Tipo II	8,0	20	5	5	5,7
Tipo III	6,2	30	6	17,5	5,7
Tipo IV	5,1	25	5	17,5	5,7
Tipo V	4,0	10	2	5	0,885
Tipo VI	2,2	6,7	1	2,3	0,885

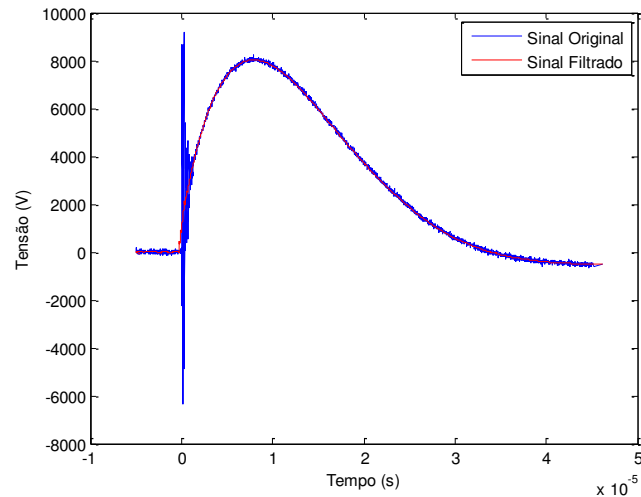
Antes de iniciar a aplicação dos impulsos nos blocos varistores foi realizado um ensaio de caracterização das amostras. Entre cada ciclo de impulsos foram realizados também ensaios de caracterização. O objetivo destes ensaios era avaliar o grau de envelhecimento das pastilhas, em decorrência dos ensaios.

Considerando que cada ensaio foi realizado duas vezes, foi realizado um total de 468 ensaios de impulsos de corrente para a formação da base de dados utilizada neste trabalho.

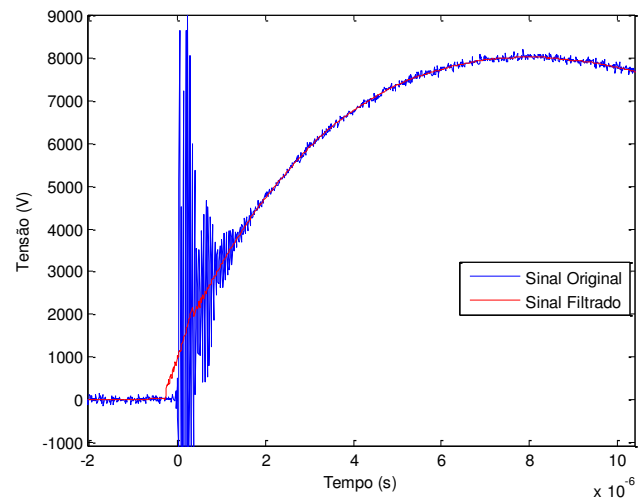
#### 4.2.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A princípio, foram observados ruídos alta de amplitude nos primeiros instantes de aplicação do impulso de corrente. Várias providências foram tomadas durante o ensaio para tentar mitigar os ruídos. O único procedimento que surtiu algum efeito foi o uso de um único ponto de aterramento, indicando assim que os ruídos seriam majoritariamente causados por laços de terra. Contudo, os procedimentos, durante o ensaio, não foram suficientes para tornar o ruído insignificante, de modo que foi preciso filtrar os sinais digitalmente, para que estes pudessem ser utilizados na identificação do para-raios. Foi utilizado um filtro passa-baixa de média móvel de cinquenta amostras.

Na Fig. 4.4 apresentam-se formas de onda típica de um impulso de corrente de 8 kA, antes e depois da filtragem. Todos os resultados que serão apresentados nesta sessão foram filtrados de forma análoga. O mesmo filtro foi utilizado nos sinais de tensão e corrente. Na Fig. 4.4 (b) fica claro que a filtragem insere um pequeno atraso no sinal, no entanto, como o mesmo filtro é utilizado para tensão e corrente, o atraso não é significativo.



(a)



(b)

Fig. 4.4: Exemplo da filtragem empregada nos dados. (a) Sinal Completo e (b) Zoom na região mais ruidosa.

Na Fig. 4.5 apresenta-se uma comparação da resposta de um varistor a impulsos de mesma amplitude, porém com formas de onda distintas.

Analisando o resultado na Fig. 4.5 é possível observar que uma redução do tempo de frente de 8 para 2,2  $\mu\text{s}$  provocou um aumento no valor de pico e uma redução de no tempo de frente da onda. A elevação do valor da tensão residual na Fig. 5.4 foi de 9%. As referências bibliográficas indicam um aumento de 6% no valor de pico da tensão em consequência de uma redução do tempo de frente de 8 para 1  $\mu\text{s}$  (IEEE 3.4.11, 1992). Contudo, os resultados experimentais obtidos neste trabalho apontam

para valores superiores a 9%. Assim, embora a dinâmica observada nos ensaios seja qualitativamente a mesma descrita nas referências, quantitativamente ela é diferente.

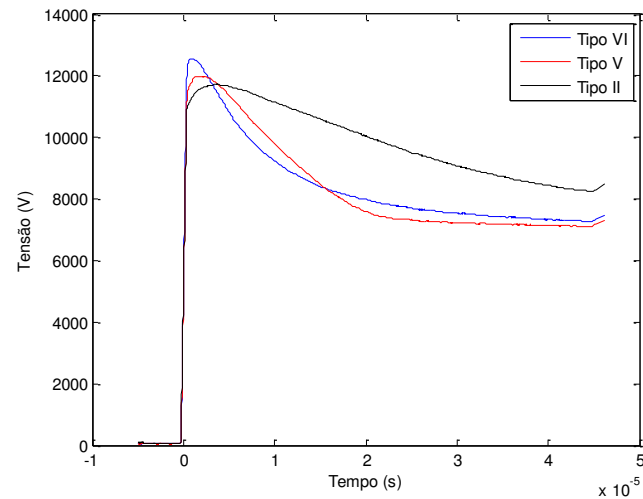
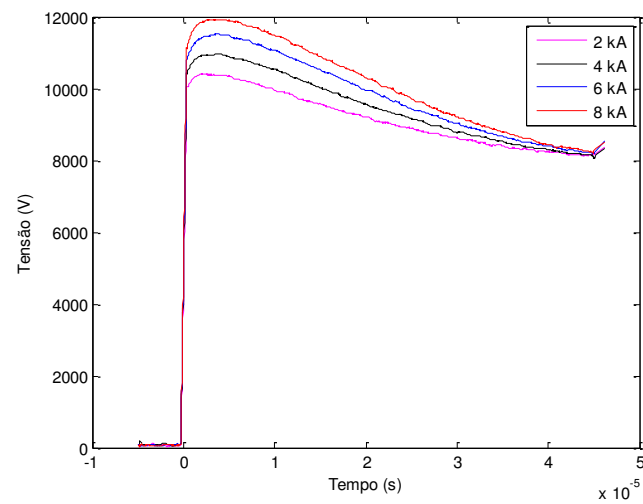
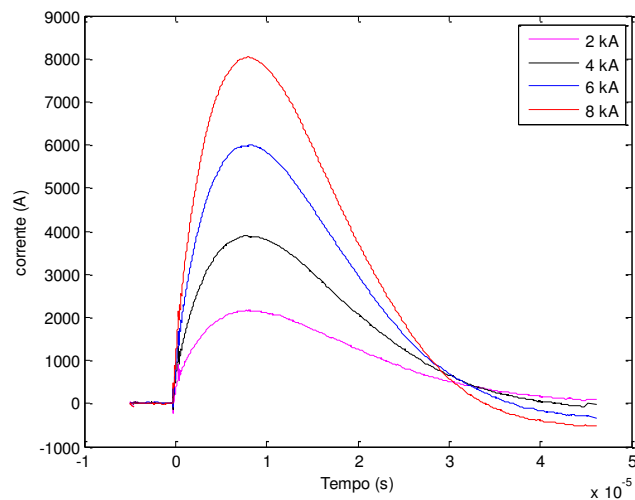


Fig. 4.5: Resultado da aplicação de impulsos de 6 kA em um varistor com diferentes formas de onda.

Na Fig. 4.6 apresenta-se uma comparação da resposta de um varistor a impulsos de mesma forma de onda, porém com amplitudes distintas.



(a)



(b)

Fig. 4.6: Resultado da aplicação de impulsos tipo II de 2, 4, 6 e 8 kA. (a) Forma de onda da tensão e (b) corrente aplicada.

Os resultados apresentados na Fig. 4.6(a) mostram que um aumento de 231,3% na amplitude máxima da corrente provocou um crescimento de apenas 12,3% na amplitude da tensão. Comparando-se, em termos percentuais, o nível de tensão residual produzido pelo aumento da magnitude da corrente com nível da tensão residual provocado pela redução do tempo de frente (de 8 para 2,2  $\mu\text{s}$ ), conclui-se que o efeito da característica dinâmica dos para-raios é significativo para os estudos de coordenação de isolamento e de suportabilidade dos equipamentos a serem protegidos.

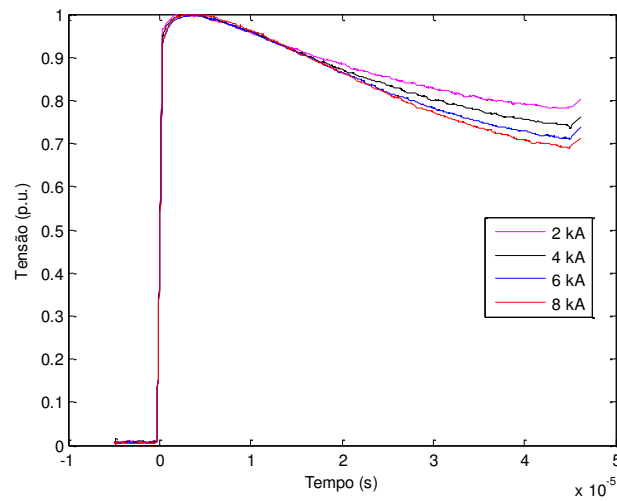
Na Fig. 4.7 são apresentadas as formas de onda da Fig. 4.6 normalizadas para facilitar a percepção visual das análises que se segue.

Analisando os resultados apresentados na Fig. 4.7 (a) é possível perceber que depois da ocorrência do valor de pico, a forma de onda dos sinais tende a diferir e a discrepância entre elas cresce com o tempo. A primeira vista seria possível concluir que o tempo de cauda está variando em função da amplitude do sinal de entrada, no entanto, como o mesmo comportamento se verifica na corrente, apresentada na Fig. 4.7 (b), deve-se então inferir que tal comportamento é decorrente das características do gerador de impulsos/aterramento e não propriamente do varistor.

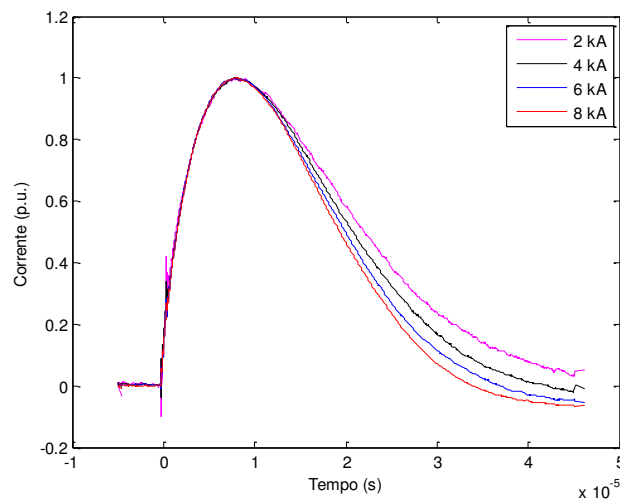
Focando a análise na região em que as correntes de entrada apresentam a mesma forma de onda, pode-se perceber que os sinais de tensão também não apresentam variações significativas, de modo que é possível concluir que a amplitude do sinal de



entrada não afeta a forma de onda do sinal de saída, servindo apenas como um fator de escala para a resposta final. Tal conclusão será importante na modelagem do varistor.



(a)



(b)

Fig. 4.7: Resultado Normalizado da aplicação de impulsos tipo II de 2, 4, 6 e 8 kA. (a) Forma de onda da tensão e (b) corrente aplicada..

A hipótese de que a amplitude do sinal de entrada afeta tão somente a amplitude do sinal de saída claramente não é válida para todos os pontos de operação do varistor (curva  $V \times I$ ). Os ensaios realizados e as análises feitas, neste trabalho, evidenciam que a amplitude do sinal de entrada não afeta a forma de onda do sinal de saída na região de alta corrente do varistor, por isto, esta constatação só será aplicada aos modelos desta região.

A Fig. 4.8 apresenta uma comparação da resposta de diferentes varistores a um impulso de mesma amplitude e forma de onda.

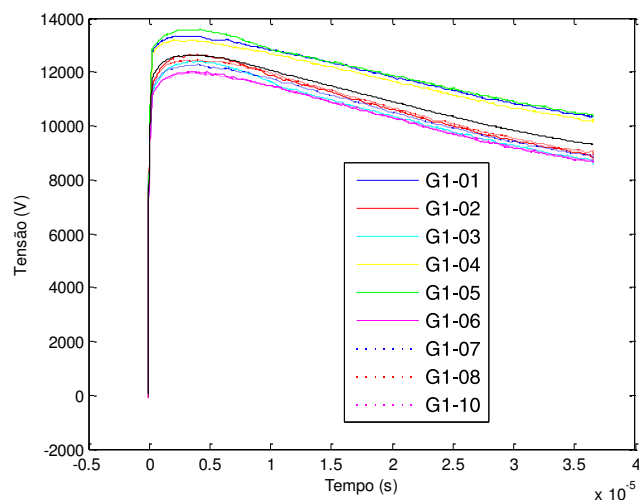


Fig. 4.8: Resposta dos diferentes varistores a um impulso tipo II com amplitude de 8 kA. Em preto está representada a média das respostas.

Os resultados apresentados na Fig. 4.8 indicam que o valor de pico da onda diferiu até 8,25% em relação à média. Análises mais aprofundadas indicam também variações menores no tempo de frente, no entanto é difícil medir com precisão esta grandeza devido ao ruído presente no sinal. Por isso, adota-se a hipótese simplificadora de que a substituição dos varistores afeta tão somente a amplitude da resposta.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DE VARISTORES

O ensaio de caracterização de varistores tem duas funções básicas: primeiramente, neste ensaio é possível obter dados de tensão e corrente do para-raios operando na região de baixa corrente. Além disto, os resultados obtidos neste ensaio podem ser utilizados como parâmetro de avaliação da evolução das condições de envelhecimento das blocos varistores ao longo dos ensaios de impulsos de corrente, podendo evidenciar a existência de danos significativos que possam comprometer os resultados de uma dada amostra. Assim, o ensaio de caracterização foi previamente realizado nas amostras e repetido ao fim de cada ciclo de ensaios de impulso de corrente, visando observar se houve alterações significativas que indiquem envelhecimento significativo na pastilha varistora.

É muito importante ressaltar que na região de baixa corrente, onde os ensaios de caracterização são feitos, tem-se uma inversão de variáveis em relação aos ensaios de impulso de corrente. Neste caso, a variável controlada é a tensão, por isto ela passa a ser considerada como variável de entrada, enquanto a corrente será a variável de saída para os eventuais modelos.

Também, deve-se ressaltar que modelos aplicáveis à região de baixa corrente não devem contemplar uma resposta ampla em frequência, uma vez que a variável de entrada está essencialmente na frequência industrial.

#### 4.3.1 MATERIAL E MÉTODO

Para realização dos ensaios de caracterização de varistores foram utilizados:

- Kit de alta tensão:
  - Mesa de controle de tensão;
  - Transformador;
  - Divisor de tensão capacitivo;
  - Resistência de Proteção (282 k $\Omega$ );
  - Resistência “*Shunt*” (1 k $\Omega$ );
  - Suportes isolantes;
  - Suporte para varistor.
- Varistores de ZnO;
- Osciloscópio;
- Computador;
- Cabos.

#### 4.3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ensaio realizado tem por objetivo submeter os varistores de ZnO a níveis crescentes de tensão na frequência industrial e medir a corrente no varistor correspondente a cada nível de tensão.

O nível de tensão aplicada durante o ensaio é limitado pela capacidade do transformador de suprir a corrente solicitada pelo varistor, de modo que a tensão é elevada até que o valor médio quadrático da corrente primária atinja meio ampère.

Antes de realizar os ensaios de caracterização os varistores foram levados à estufa para remoção de umidade.

O arranjo mostrado na Fig. 4.9 foi montado para realização do ensaio. O circuito é composto, basicamente, por uma fonte de tensão senoidal, um transformador elevador de tensão, uma resistência de proteção  $R$  conectada em série a um divisor capacitivo e em paralelo a este, uma resistência shunt,  $R_{shunt}$ , em série com o objeto de teste, o varistor.

A aquisição de dados é feita através do osciloscópio, que realiza a aquisição da tensão através do divisor capacitivo e da corrente através do *shunt*. Ao fim do ensaio os dados são passados a um computador pessoal para serem processados posteriormente.

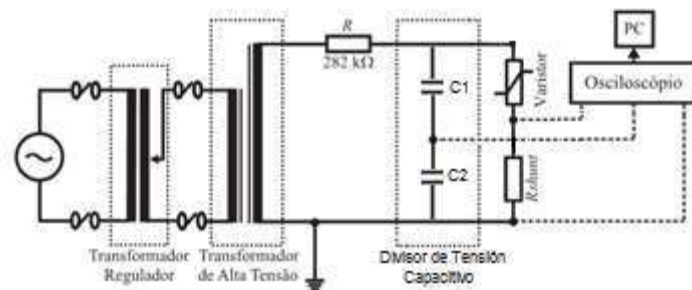


Fig. 4.9: Circuito utilizado na realização do ensaio de caracterização.

Na Fig. 4.10 é apresentada uma fotografia do kit de alta tensão preparado para a realização de ensaio de caracterização.



Fig. 4.10: Kit de alta tensão preparado para realização de ensaio de caracterização, na fotografia não aparecem o osciloscópio nem o resistor *shunt*.

### 4.3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao contrário dos ensaios de impulso de corrente, o ruído não foi significativo nos ensaios de caracterização, por tanto não se faz necessário filtrar os sinais obtidos.

Na Fig. 4.11 apresentam-se os resultados da primeira caracterização, realizada antes do início dos ensaios de impulso de corrente, enquanto que, na Fig. 4.12 apresentam-se os resultados da última caracterização, realizada após a aplicação de todos os impulsos.

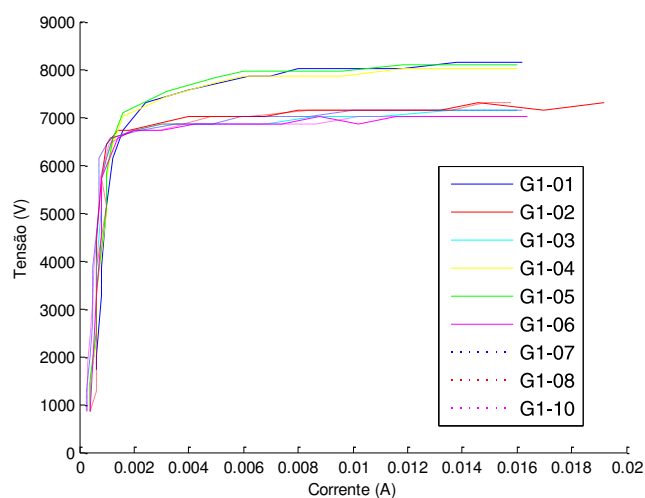


Fig. 4.11: Curva de caracterização inicial dos varistores.

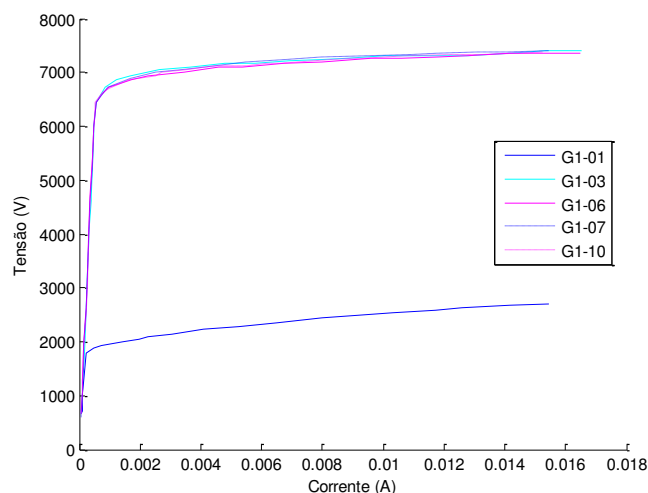
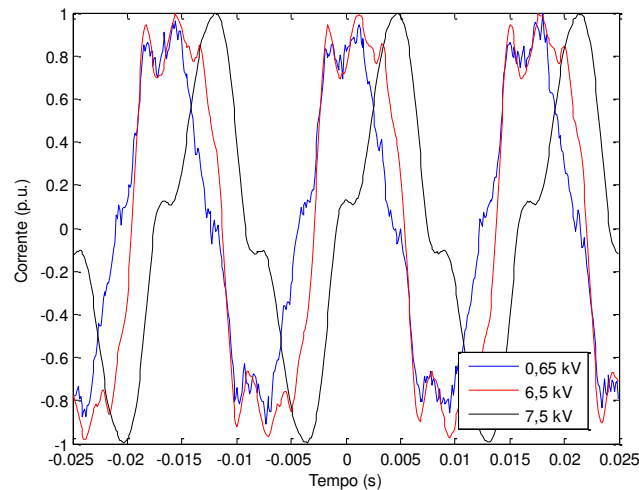


Fig. 4.12: Curva de caracterização final dos varistores.

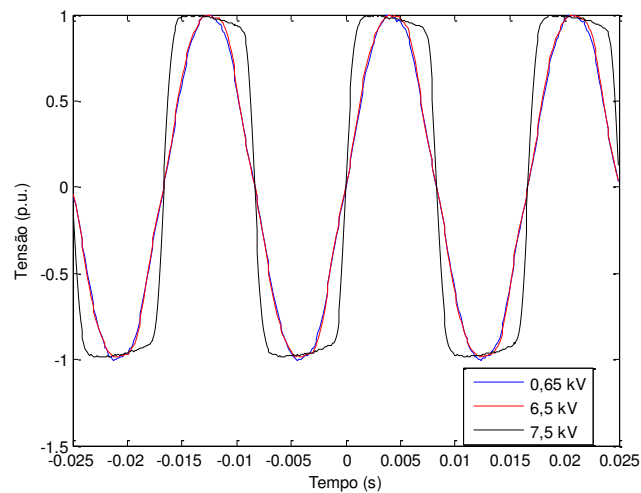
Os varistores G1-02, G1-04, G1-05, G1-08 foram destruídos nos ensaios de impulso de corrente e por isso, não estão apresentados na Fig. 4.12. Além disso, apesar

de não ter sido destruído como os demais, o resultado da Fig. 4.12 evidencia que o varistor G1-01 degradou-se severamente.

Na Fig. 4.13 estão representados três exemplos de formas de onda de corrente e tensão para um determinado varistor. As amplitudes dos sinais foram normalizadas para facilitar a visualização.



(a)



(b)

Fig. 4.13: Formas de onda de (a) corrente e (b) tensão, para o varistor G1-02.

Observando os resultados apresentados na Fig. 4.13, confirma-se que, ao contrário da região de alta corrente, a amplitude do sinal de entrada afeta a forma de onda do sinal de saída. Também é possível constatar que o pico do sinal de saída tende a

se aproximar do pico do sinal de entrada, ilustrando o crescimento da componente resistiva da corrente.

As formas de onda em azul e vermelho, apresentadas na Fig. 4.13 (b), estão muito próximas, enquanto que o sinal em preto é muito diferente dos demais, apresentando uma elevada distorção harmônica. A distorção é consequência da limitada capacidade de fornecimento de corrente por parte do transformador, não se caracterizando por uma barra forte.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo foi discutido o processo de formação e algumas características da base de dados utilizada neste trabalho.

Os resultados apresentados nas Figs. 4.8 e 4.11 ilustram que a resposta de varistores idênticos a ensaios idênticos têm variações significativas. Este tipo de comportamento claramente não pode ser representado por nenhum tipo de modelo determinístico, afinal modelos de sistemas idênticos terão respostas idênticas.

Repetições nos ensaios conduziram a respostas idênticas, com desvios de no máximo 1% dos apresentados nas Fig. 4.8, 4.11 e 4.12, enfraquecendo assim a possibilidade de que algum fator estatístico fosse responsável pelos desvios na resposta de varistores idênticos. Tal constatação desencoraja o uso de modelos estatísticos ou estocásticos.

A única grandeza que é sabidamente distinta em todas as amostras é a altura das pastilhas, conforme a Tabela 4.1, porém não se observa correlação entre a altura da pastilha e sua resposta. Assim, propõe-se a teoria de que alguma característica microestrutural, decorrente do processo de fabricação, dos varistores os diferencia e faz com que a sua resposta tenha os desvios apresentados nos resultados em questão. Esta teoria explica também por que a característica dinâmica obtida nestes ensaios é quantitativamente diferente da apresentada nas referências.

Naturalmente, o desvio na resposta de qualquer modelo desenvolvido será sempre superior ao desvio presente nos dados, por tanto, para minimizar o erro máximo obtido nas simulações dos modelos que serão desenvolvidos, o valor médio das respostas será utilizado para identificar os modelos.

Algumas observações dos dados serão importantes para propor os modelos, como por exemplo, para alta corrente a forma de onda da resposta independe da amplitude do sinal de entrada. O uso deste tipo de informação na construção de um modelo o caracteriza como um modelo caixa-cinza.



## CAPÍTULO 5

# MODELO MATEMÁTICO DE UM VARISTOR DE ZNO

### 5.1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos capítulos anteriores foram brevemente discutidas as bases para criação de um modelo matemático. Neste capítulo serão discutidos o desenvolvimento, as características e os resultados de um modelo matemático para varistores de óxido de zinco.

No Capítulo 3 foram elencados sete pontos básicos que devem ser verificados na criação de um modelo. Para o desenvolvimento desta dissertação os pontos foram atendidos da seguinte forma:

- A determinação da forma de onda da tensão é objetivo do modelo, logo a forma de onda da tensão será a variável de saída. Os dados de saída do modelo foram obtidos através de ensaios de impulso de corrente, por isso, a forma de onda da corrente é a escolha natural para sinal de entrada;
- A escolha dos sinais de excitação fica atrelada às possibilidades do gerador de impulso de corrente, de modo que os seis tipos de sinais aplicados nos varistores, conforme descrito no Capítulo 4, serão os sinais de excitação utilizados na modelagem;
- Os aspectos mais relevantes da arquitetura do modelo são:
  - O modelo será aplicado a um problema dinâmico;
  - O modelo deverá realizar simulações;
  - Os parâmetros do modelo serão determinados de forma *off-line*, de modo que não há restrições de tempo de processamento.
- Serão utilizadas estruturas tipo NARX como representação dinâmica para modelar o varistor;

- A escolha dos parâmetros será realizada através de algoritmos consolidados adequados à estrutura escolhida para o modelo;
- A validação do modelo será realizada através de simulações e de critérios estatísticos.

Todas as rotinas utilizadas no procedimento de modelagem foram desenvolvidas na plataforma Matlab®. Todos os sinais utilizados para determinação, validação e avaliação dos modelos desenvolvidos foram obtidos a partir da média da resposta dos diferentes varistores nos ensaios descritos no Capítulo 4.

## 5.2 MODELO CAIXA-PRETA

Inicialmente, os dados obtidos com os ensaios de impulso de corrente foram diretamente aplicados no desenvolvimento de um modelo caixa-preta, ou seja, sem o uso de qualquer observação em relação às características do varistor.

O processo de determinação da estrutura a ser utilizada para modelar o comportamento do varistor foi conduzido analisando paralelamente diferentes possibilidades. Nestas análises observou-se que estruturas contendo termos de média móvel conduziram a modelos polarizados, por isso, ao invés da representação geral NARMAX este trabalho empregou caso particular NARX para modelagem do varistor. Ao fim das análises, levando em consideração as características do sistema a ser modelado e da aplicação do modelo, foi escolhida a representação NARX polinomial. A título de exemplo, a seguir será discutida uma comparação entre a estrutura escolhida e um das diferentes estruturas candidatas, no caso do exemplo uma Rede Neural Artificial, que foram analisadas e descartadas.

Para este exemplo de comparação de estrutura, foram utilizados apenas os dados para impulso tipo II. Buscou-se realizar o teste da forma mais simples possível, por isso a estrutura NARX foi determinada com ordem e número de atrasos iguais a um, e a Rede Neural utilizada foi do tipo *Multi Layer Perceptron*, com apenas uma camada oculta. Os parâmetros de cada estrutura foram determinados com algoritmos comumente empregados a estas estruturas: o método dos mínimos quadrados para o NARX e o algoritmo *Backpropagation* para a Rede Neural.

Como mostrado na Fig. 5.1, nenhuma das estruturas representou bem o problema, contudo a resposta da representação NARX foi escolhida para ser utilizada

por apresentar um resultado aparentemente mais promissor. Por isso não há neste trabalho discussões acerca do tema de Redes Neurais.

Naturalmente, esta é uma descrição simplificada. As Redes Neurais não foram e não podem ser descartadas como forma de representação viável para o varistor. Durante um longo tempo várias estruturas foram consideradas candidatas para modelagem do varistor. Contudo, em determinado momento foi preciso concentrar esforços em uma das abordagens, pois o tempo é um recurso finito e naquele momento a representação NARX pareceu mais promissora. Sobretudo por que no futuro o modelo proposto neste trabalho deverá ser implementado em softwares de simulação de transitórios, então é importante que o modelo tenha uma estrutura simples. Neste sentido, não se descarta a possibilidade de que surjam dificuldades para implementar a estrutura NARX em simuladores como o ATP, mas certamente, implementar uma estrutura como uma Rede Neural seria ainda mais complexo.

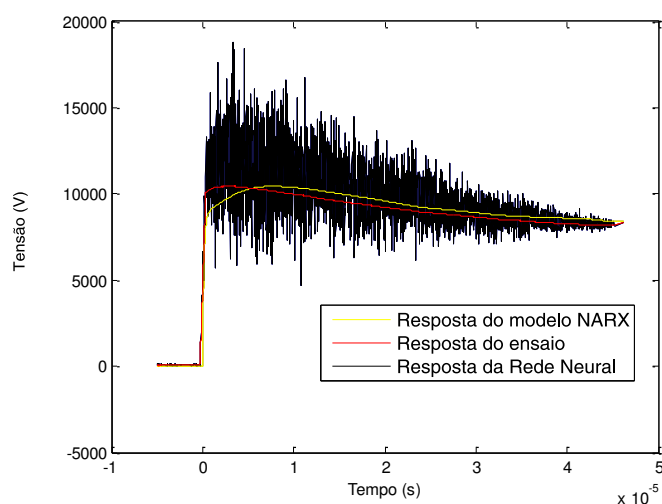


Fig. 5.1: Resultado dos testes preliminares para a escolha do tipo de representação dinâmica a ser utilizada.

Uma vez estabelecido que seria utilizada uma representação tipo NARX, procurou-se melhorar o desempenho do modelo Caixa-Preta com essa representação.

A determinação da estrutura do modelo NARX polinomial consistem em determinar a ordem e número de atrasos que serão levados em consideração no modelo. Observou-se que, para ordens superiores a três, a resposta desta estrutura apresentava muitas oscilações, chegando a se tornar instável na resposta a impulsos mais rápidos. Com relação ao número de atrasos, observou-se que mais de que dois atrasos nos sinais de entrada e saída não contribuíam de forma significativa com a resposta.

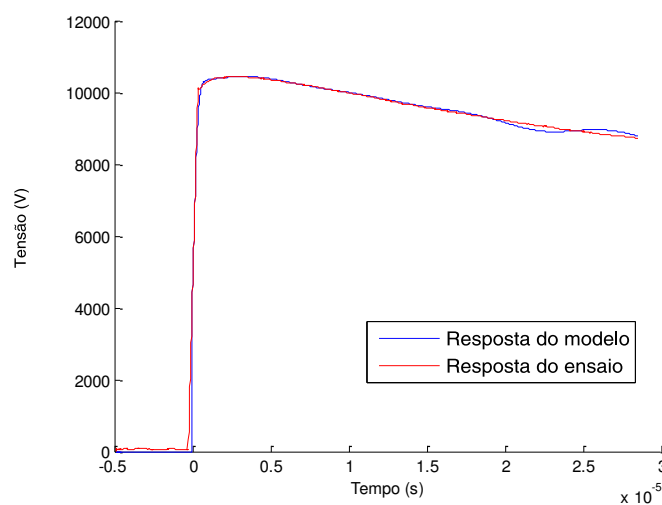
Assim, um modelo NARX polinomial para representar os dados obtidos nos ensaios de impulso de corrente deverá ter uma ordem menor ou igual a três e um número de atrasos nas variáveis de saída ou entrada menor ou igual a dois, totalizando 18 possíveis estruturas. Por tentativa e erro, constatou-se que das 18 estruturas a que apresenta melhor resultado é aquela de ordem dois, um atraso na saída e dois atrasos na entrada. A Eq. 5.1 representa esta estrutura:

$$v(t) = K_0 + \sum_{i_1=1}^3 (K_{i_1} * X_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^3 \sum_{i_2=i_1}^3 (K_{i_1 i_2} * X_{i_1} * X_{i_2}). \quad (5.1)$$

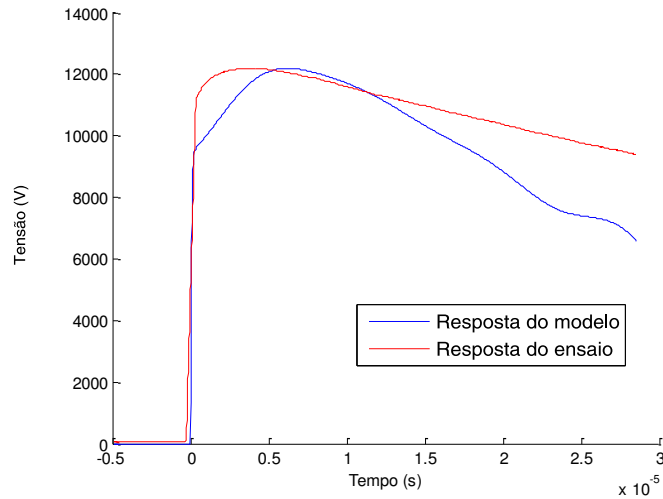
Em que,  $K$  são os parâmetros do modelo,  $t$  é a variável discreta tempo e  $X_1=v(t-1)$ ,  $X_2=i(t)$  e  $X_3=i(t-1)$ ,  $v$  e  $i$  são os vetores de tensão e corrente, respectivamente.

A Eq. 5.1 apresenta dez termos, cada termo é composto de um parâmetro  $K$ , que será determinado pelo método dos mínimos quadrados. Uma vez que a estrutura NARX é linear nos parâmetros, o que é conhecido por não-linearidade fraca, o método dos mínimos quadrados pode ser aplicado em batelada diretamente. Cada parâmetro multiplica uma combinação não linear de valores passados de tensão e corrente, estas combinações devem conter a informação necessária para prever o próximo valor da tensão e são chamadas de regressores.

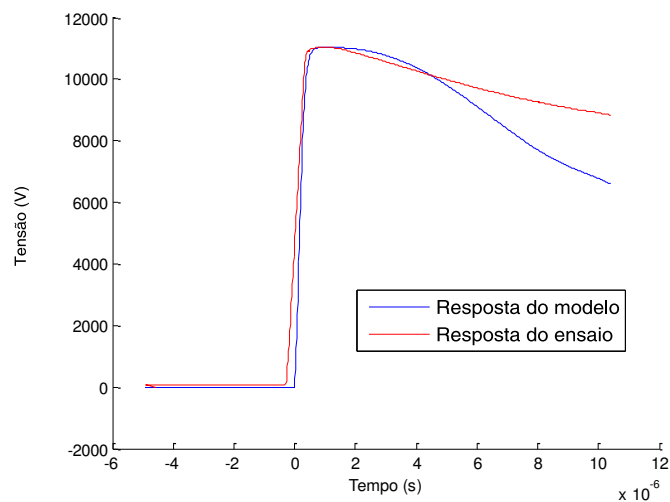
Novamente, para determinar os parâmetros  $K$  foram utilizados os dados de impulsos tipo II com corrente de 2 kA. Na Fig. 5.2 apresenta-se o resultado das simulações da resposta do modelo para alguns impulsos diferentes.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.2: Resultado da simulação de impulsos de corrente com o modelo descrito na Eq. 5.1 para: (a) um impulso tipo II com amplitude de 2 kA, (b) Tipo II com amplitude de 8 kA e (c) Tipo VI com amplitude de 2 kA.

Se uma forma de onda diferente é utilizada para determinar os parâmetros do modelo, ele responde tão bem a nova forma de onda, quanto foi obtida na Fig. 5.2(a), da mesma forma, ele só responderá bem ao sinal particularmente utilizado. Tal comportamento indica que a estrutura utilizada pode reproduzir a resposta do varistor, contudo, os parâmetros determinados não permitem uma resposta flexível que caracterize bem diferentes formas de onda, logo, o desempenho do modelo com estas características não é aceitável.

Assim, devem-se tomar providencias para tornar o modelo mais flexível, de modo que possa responder igualmente bem a sinais de diferentes amplitudes e formas de onda.

As prováveis causas do desempenho insatisfatório do modelo são:

- Um ou mais dos regressores utilizados na Eq. 5.1 não contribuem com informação para a resposta, sendo apenas fonte de erro;
- Apenas um impulso de corrente não é suficiente para caracterizar a dinâmica do varistor.

Depois de resolver os problemas citados, é possível utilizar conhecimentos prévios acerca do varistor para tentar melhorar o desempenho do modelo.

## 5.3 APRIMORAMENTO DO MODELO

### 5.3.1 FLEXIBILIZAÇÃO DO MODELO

Como mencionado no Capítulo 3, para o desenvolvimento de um bom modelo, o sinal de excitação deve ter uma larga faixa de frequência e amplitudes para cobrir toda a dinâmica do sistema. Infelizmente, a natureza dos para-raios não permite que ensaios com estas características sejam realizados. Assim, para tornar o modelo mais abrangente é preciso criar artificialmente esta excitação ampla.

Assumindo que o varistor possui uma dinâmica modelável, a dinâmica por traz da resposta a cada impulso de corrente é única. Partindo deste pressuposto, é possível criar um conjunto entrada/saída artificialmente, concatenando a resposta a diferentes ensaios isolados.

O uso de diferentes amplitudes e formas de onda no processo de identificação do modelo deve torná-lo mais flexível. Contudo, um modelo construído desta forma não teria aplicabilidade, uma vez que dificilmente os catálogos de fabricantes fornecem a forma de onda da resposta do varistor para vários impulsos diferentes do impulso  $8/20 \mu\text{s}$ , padrão. Por isso, buscou-se utilizar apenas os dados de impulsos tipo II para identificar o modelo e os demais tipos de impulsos serão utilizados apenas para validar o modelo.

A determinação da combinação de ensaios mais adequada para representar o comportamento de varistores constitui um problema de seleção de excitação. A escolha

correta de sinal de excitação será aquela que apresentar a maior correlação entre entrada e saída (AGUIRRE, 2004). Através deste critério, observou-se que a melhor forma de caracterizar o comportamento do varistor seria o uso de uma composição de sinais com 2 e 8 kA.

### 5.3.2 EXCLUSÃO DE REGRESSORES ESPÚRIOS

Detectar quais regressores de um modelo não linear que contribuem para o modelo e quais são fontes de erro não é uma tarefa fácil. As referências acerca desse tema sugerem métodos subjetivos de realizar a seleção, como por exemplo, suspeitar de regressores com parâmetros destoantes dos demais, suspeitar de regressores cujos parâmetros oscilem à medida que se aumenta o número de parâmetros do modelo.

Neste trabalho, buscou-se aplicar diferentes procedimentos subjetivos de seleção, como avaliar o efeito da eliminação de regressores cujos parâmetros fossem muito maiores ou muito menores do que os demais, variar de forma crescente o valor de determinado parâmetro e ainda criar diferentes modelos com um número diferente de parâmetros e procurar por inconsistências nos valores destes parâmetros. Nenhuma destas análises subjetivas indicou de forma contundente quais regressores eram importantes e quais eram espúrios.

Neste caso, não existe alternativa além da repetitiva tarefa de testar todas as combinações possíveis de regressores. Existem 10 regressores, inicialmente eles foram testados um a um, o que implica em 10 possíveis combinações, depois foram testados de dois em dois, o que implica em 45 possíveis combinações, e assim sucessivamente. Naturalmente, seria impraticável realizar manualmente tantos testes, por isso foi escrita uma rotina e a partir dela, constatou-se que a melhor representação utiliza oito regressores e toma  $v^2(t-1)$  e 1 como espúrios. Assim, eliminando os regressores espúrios a Eq. 5.1 se transforma na Eq. 5.2.

$$\begin{aligned}
 V(t) = & K_1 * v(t-1) + K_2 * i(t) + K_3 * i(t-1) + K_5 * v(t-1) * i(t) & (5.2) \\
 & + K_6 * v(t-1) * I(t-1) + K_7 * i^2(t) + K_8 * i(t) \\
 & * i(t-1) + K_9 * i^2(t-1).
 \end{aligned}$$

É importante salientar que os regressores utilizados na Eq. 5.2 são os mais adequados para a base de dados que se dispõe. Possivelmente uma expansão da base de dados, para contemplar impulsos de polaridade negativa por exemplo, irá alterar quais serão os regressores utilizados.

### 5.3.3 USO DE INFORMAÇÃO AUXILIAR

A natureza dos varistores e dos ensaios utilizados para formar a base de dados impedem a realização de ensaios únicos que excursionem toda a dinâmica do varistor. Por isso foi preciso realizar uma composição de sinais de excitação para melhor representar os fenômenos envolvidos. Contudo, pelos motivos já citados, só devem ser utilizados sinais tipo II na excitação do modelo, de modo que, a excitação utilizada para o modelo não irá acessar toda a faixa de operação pretendida para o modelo. O trabalho de (CORRÊA *et al.*, 2002) conclui que o uso de informação auxiliar é útil para compensar a falta de dados em certas regiões de operação de um sistema. Por isso, buscou-se incorporar observações realizadas nos ensaios para melhorar o desempenho do modelo.

Conforme apresentado no Capítulo 4, a amplitude do sinal de corrente não tem influência significativa sobre a forma de onda da tensão, servindo apenas como um fator de escala, de modo que, é possível calcular a forma de onda do sinal de tensão independente da amplitude do sinal, a partir apenas da forma de onda do sinal de corrente.

Assim, caso se utilize sinais normalizados no processo de identificação, espera-se que o modelo represente melhor a resposta do varistor, uma vez que não terá de lidar com a informação secundária da amplitude da corrente. Contudo, cria-se um novo problema: o modelo deverá realizar uma representação mais precisa da forma de onda da tensão, entretanto, não irá determinar a sua amplitude.

Naturalmente, faz-se necessário um procedimento secundário para calcular a amplitude da forma de onda de tensão. O cálculo da amplitude deverá ter uma boa precisão, uma vez que esta é a variável mais importante em estudos de coordenação de isolamento. Assim, deve-se buscar algum conhecimento acerca do funcionamento do varistor que forneça a informação necessária para se determinar separadamente a amplitude da forma de onda da tensão. A respeito da amplitude da tensão no varistor sabe-se que:



- A amplitude da forma de onda da tensão cresce em função do aumento da amplitude da forma de onda da corrente;
- A amplitude da forma de onda da tensão cresce em função da diminuição do tempo de frente da forma de onda da corrente.

É possível construir um modelo secundário que determine a amplitude da tensão em função da amplitude da corrente, para um dado tempo de frente fixo, contudo, para que este procedimento pudesse ser aplicado, seria necessária uma equação que correlaciona amplitude da corrente e amplitude da tensão e os parâmetros deste modelo secundário devem estar em função do tempo de frente do sinal. Com os dados que se dispõe para a realização deste trabalho não é possível determinar tal equação com precisão satisfatória. Surge assim um impasse, pois, existe um modelo para determinar a amplitude da resposta, mas não é possível determinar os seus parâmetros.

A alternativa para contornar o impasse é tentar uma abordagem multivariável, contudo, as respostas dos impulsos são descorrelacionadas umas das outras, por isso este modelo multivariável tem apenas dois regressores possíveis, tempo de frente e amplitude da corrente. Na tentativa de facilitar a busca de alguma estrutura que fizesse esta correlação, foi construída a Fig. 5.3 que apresenta um gráfico tridimensional com a amplitude da tensão em função da amplitude da corrente e do tempo de frente do sinal de corrente.

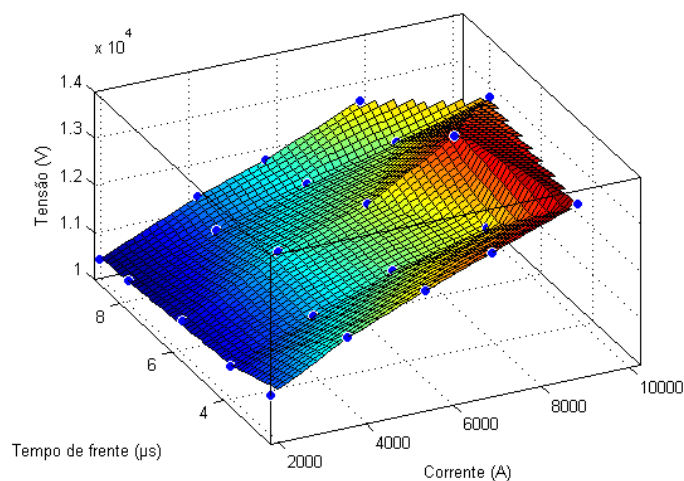


Fig. 5.3: Gráfico tridimensional da amplitude da tensão em função da amplitude da corrente e do tempo de frente da resposta.

O gráfico apresentado na Fig. 5.3 sugere que os pontos de amplitude da tensão, e amplitude e tempo de frente da corrente definem aproximadamente um plano. Assim,

utilizando a equação de um plano como estrutura, é possível determinar um modelo  $t \times i \times v$  (tempo de frente, valor de pico da corrente, tensão residual) .

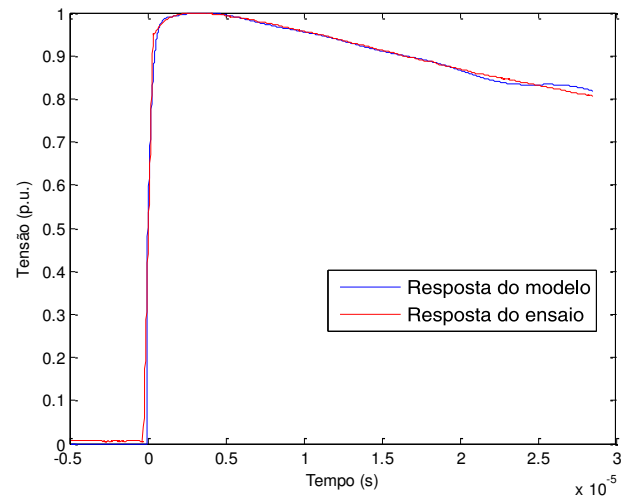
Para que este modelo atinja seu melhor desempenho, seria necessário utilizar o máximo de informações obtidas nos ensaios, por outro lado, para criar um modelo que possa ser identificado apenas com informações providas por fabricantes, não é correto utilizar todos os pontos que se dispõem neste trabalho para ajustar este modelo, uma vez que, dificilmente algum fabricante irá prover tantos valores para amplitude da tensão. O fabricante dos varistores utilizados fornece uma curva com valores da amplitude da tensão em função da amplitude da corrente para impulsos com 1, 4 e 8  $\mu\text{s}$  de tempo de frente, assim se utilizou apenas os ensaios tipo II e V para ajustar a equação do plano. Neste caso, o erro máximo obtido foi de 6,67% na simulação da amplitude da tensão em resposta a um impulso com 6  $\mu\text{s}$  de tempo de frente e 8 kA de amplitude.

Deve-se lembrar de que todos os dados utilizados são na realidade a média das respostas das amostras de varistores avaliadas e, conforme descrito no Capítulo 4, foram obtidos desvios superiores a 8% em relação à média, de forma que, o erro máximo na determinação da amplitude é inferior à flutuação natural dos dados utilizados.

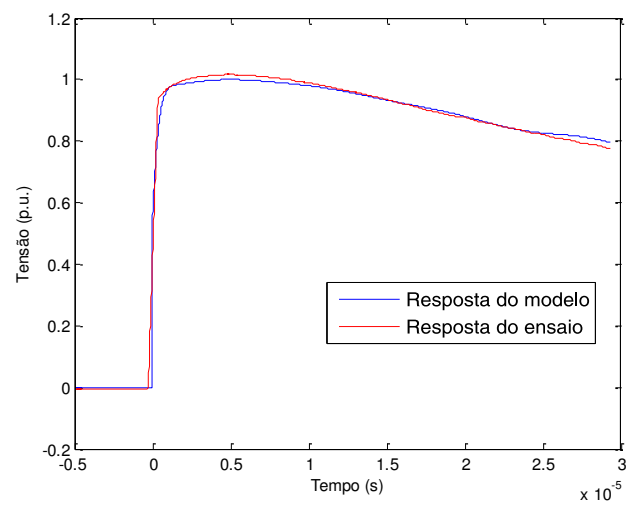
## 5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO NARX

Após a aplicação dos procedimentos descritos na seção anterior, é necessário determinar se o modelo obtido é uma representação válida para um varistor.

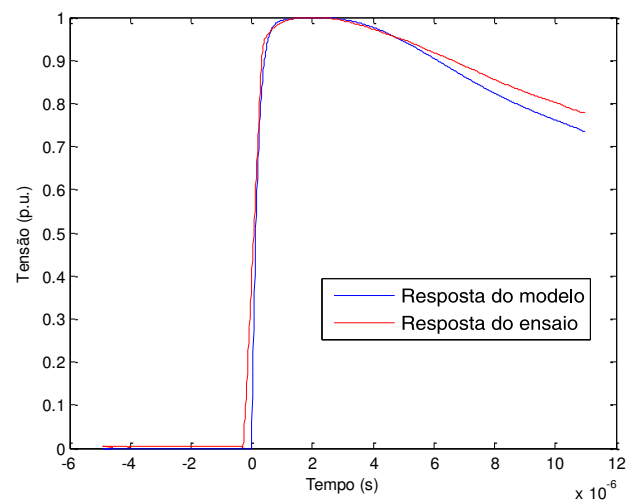
Agora, resta determinar se o modelo representa os dados de forma satisfatória, para isto é preciso realizar simulações com diferentes impulsos. Para ilustrar o desempenho do modelo em diferentes situações, na Fig. 5.4 são apresentados alguns exemplos de respostas a diferentes sinais.



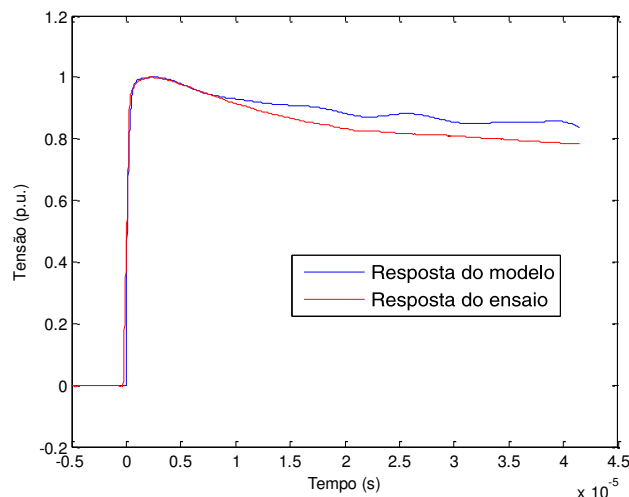
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.4: Exemplos da resposta do modelo NARX a impulsos (a) tipo II com amplitude de 2 kA, (b) tipo I com 4 kA, (c) tipo V com 8 kA e (d) tipo IV com 6 kA.

A Tabela 5.1 apresenta uma descrição mais completa do desempenho final do modelo. Para avaliar o desempenho do modelo na representação da forma de onda da tensão utilizou-se a estatística R-quadrado, que é um critério comumente utilizado neste tipo de aplicação. A estatística R-quadrado determina percentualmente quanto dos dados originais o modelo consegue explicar, um valor de R-quadrado próximo a um significa que o modelo conseguiu representar bem a resposta e quanto mais próximo a zero pior foi a representação. Por sua vez, a amplitude da resposta, determinada pelo procedimento descrito anteriormente, foi avaliada através do erro percentual em relação ao valor esperado.

Os resultados apresentados na Fig. 5.4 e na Tabela 5.1 permitem algumas análises. Primeiramente, o melhor desempenho do modelo aconteceu nos dados utilizados para identificar seus parâmetros, os impulsos tipo II. Ao contrario dos resultados obtidos antes dos aprimoramentos do modelo, a resposta para as demais formas de onda também pode ser considerada satisfatória, atingindo um R-quadrado superior a 0,9, em quase todas as simulações, tendo sido inferior a esta marca em apenas dois dos 50 casos apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Estatística de Desempenho do modelo NARX de um varistor.

<b>Tipo do impulso</b>	<b>Amplitude (kA)</b>	<b>R-Quadrado</b>	<b>Erro no valor de pico (%)</b>
I	2	0,9698	-0,35
	4	0,9840	-2,66
	6	0,9859	-2,86
	8	0,9859	-4,44
II	2	0,9789	0,35
	4	0,9864	-0,64
	6	0,9884	-0,65
	8	0,9905	0,19
	10	0,9774	0,69
III	2	0,9508	0,47
	4	0,9454	-3,14
	6	0,9492	-3,18
	8	0,9094	-6,67
IV	2	0,9350	-0,17
	4	0,9124	-3,96
	6	0,8956	-5,30
	8	0,8822	-6,12
V	2	0,9820	-1,21
	4	0,9866	-0,22
	6	0,9931	-0,97
	8	0,9938	0,09
VI	2	0,9633	-0,70
	4	0,9559	-3,74
	6	0,9671	-4,75
	8	0,9758	-5,11
	10	0,9808	-5,45

Observando a Fig. 5.4(d) e os resultados apresentados na Tabela 5.1, é possível perceber que os piores desempenhos do modelo ocorreram na resposta a sinais tipo III e IV. Para tentar explicar o desempenho inferior, a Fig. 5.5 apresenta as formas de onda de corrente normalizada para sinais tipo IV.

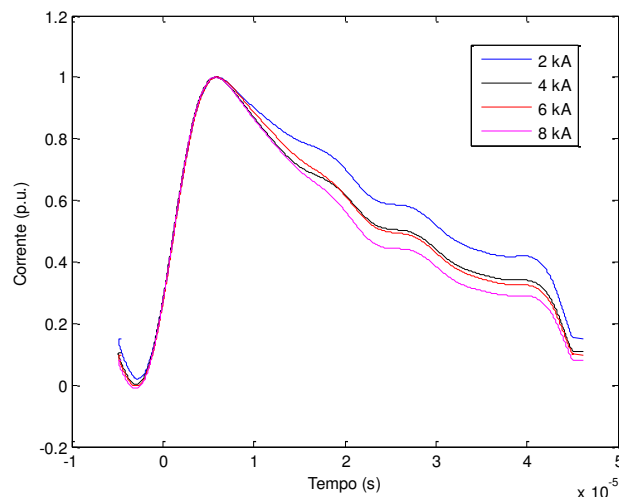


Fig. 5.5: Formas de onda de corrente normalizadas pelo valor de pico para os sinais tipo IV. Em azul, vermelho preto e magenta estão representadas as formas de onda de 2, 4, 6, e 8 kA, respectivamente.

Analisando a Fig. 5.5 é possível perceber que estas formas de onda estão bastante distorcidas, principalmente em comparação com as formas de onda apresentadas na Fig. 4.7. Um comportamento similar também pode ser observado nas formas de onda dos sinais tipo III. As ondulações no sinal são consequência de um índice de ruído mais elevado do que os dos demais experimentos. Foi mencionado no Capítulo 4 que, por imperfeições do gerador de impulso ou do seu aterramento, a forma de onda da corrente tende a se alterar depois do valor de pico, mas nas formas de onda tipo III e IV esta característica é notoriamente mais pronunciada do que nos demais tipos de forma de onda. Assim, devido ao índice de ruído mais elevado e a elevada discrepância nas formas de onda de corrente, é possível inferir que os impulsos de corrente tipo III e IV foram sinais gerados com qualidade inferior aos demais, justificando assim seu desempenho inferior.

Prosseguindo com a análise dos dados da Tabela 5.1, é possível perceber que o procedimento de cálculo de valor de pico proposto atingiu bons resultados, contudo, na maioria dos casos a simulação foi ligeiramente inferior ao valor real, quando o ideal seria que fosse ligeiramente maior, para que a simulação fosse conservativa e diminuir a possibilidade de ter problemas de coordenação de isolamento. Tal problema pode ser facilmente corrigido multiplicando a resposta do modelo por um fator de segurança.

Em suma, pode-se dizer que os procedimentos aplicados transformaram o modelo caixa-preta inadequado, em uma representação caixa-cinza com boa precisão no cálculo da amplitude e forma de onda da resposta de um varistor de óxido de zinco, a sinais com uma larga faixa de amplitude e forma de onda.

A análise dos resultados apresentados nas Fig5.4 e 5.5 bem como na Tabela 5.1, indicam que o modelo desenvolvido é uma representação válida para as amostras analisadas, contudo, se este modelo for aplicado a amostras diferentes os parâmetros calculados serão diferentes, não só isso, se fosse realizada uma nova medição nas mesmas amostras e o mesmo procedimento fosse aplicado, os parâmetros determinados também seriam diferentes devido ao ruído dos ensaios. Assim sendo, os resultados apresentados não são suficientes para garantir que o modelo é estatisticamente válido.

Partindo do princípio que diferentes realizações do modelo vão conduzir a diferentes valores dos parâmetros conclui-se que, os parâmetros do modelo são uma variável aleatória. Por outro lado, quando se vai fazer um modelo a premissa básica é que existe um grupo de parâmetros que minimiza o seu erro, esse grupo de parâmetros, ainda que sejam desconhecidos, é uma variável determinística. Naturalmente, para que o modelo seja válido, os parâmetros calculados devem ser próximos dos parâmetros ideais desconhecidos, mas, se tratando de uma variável aleatória uma única realização não é suficiente para caracterizar um bom ou mau desempenho, assim a diferença entre a esperança matemática dos parâmetros do modelo e os parâmetros determinísticos desconhecidos deve ser nula, caso não seja, o cálculo dos parâmetros apresenta tendência para um determinado valor de parâmetros, fazendo com que o modelo seja estatisticamente inválido, ou seja, mesmo que num determinado grupo de testes ele realize uma boa simulação dos dados, o modelo não é válido para o caso geral. Quando isto acontece, diz-se que o modelo está polarizado.

Apesar desta descrição sucinta, determinar se o modelo apresenta ou não polarização não é trivial, uma vez que, como mencionado, os parâmetros ótimos não são conhecidos. Assim para se determinar se há ou não polarização deve-se observar o resíduo da modelagem. Quando se analisa um modelo linear, para que haja polarização, deve-se garantir que o resíduo seja aleatório (branco) e descorrelacionado com o sinal de entrada (LJUNG, 1987), contudo, para modelos não-lineares, como é o caso deste trabalho, não existe um teste ou procedimento que possa garantir a não polarização do modelo. Por outro lado, o trabalho de vários autores (BILLINGS e VOON, 1986; BILLINGS e VOON, 1983; BILLINGS e TAO, 1991; BILLINGS e ZHU, 1994; BILLINGS e ZHU, 1994) apresenta relações que podem evidenciar a existência de polarizações. As Eq. 5.3 a 5.11 apresentam um conjunto de relações que, se não verificadas, indicam a presença de polarização no modelo.

$$\phi_{\varepsilon\varepsilon}(\tau) = E[\varepsilon(t)\varepsilon(t - \tau)] = \delta(\tau), \quad (5.3)$$

$$\phi_{\varepsilon u}(\tau) = E[\varepsilon(t)u(t - \tau)] = 0, \forall \tau, \quad (5.4)$$

$$\phi_{\varepsilon\varepsilon u}(\tau) = E[\varepsilon(t)\varepsilon(t - \tau)u(t - \tau)] = 0, \forall \tau, \quad (5.5)$$

$$\phi_{u^2, \varepsilon}(\tau) = E\left[\left(u^2(t) - E(u^2(t))\right)\varepsilon(t - \tau)\right] = 0, \forall \tau, \quad (5.6)$$

$$\phi_{u^2, \varepsilon^2}(\tau) = E\left[\left(u^2(t) - E(u^2(t))\right)\varepsilon^2(t - \tau)\right] = 0, \forall \tau, \quad (5.7)$$

$$\phi_{\varepsilon\varepsilon}(\tau) = E\left[\left(\varepsilon(t) - E(\varepsilon(t))\right)\left(\varepsilon(t - \tau) - E(\varepsilon(t))\right)\right] = 0, \forall \tau, \quad (5.8)$$

$$\phi_{\varepsilon\varepsilon^2}(\tau) = E\left[\left(\varepsilon(t) - E(\varepsilon(t))\right)\left(\varepsilon^2(t - \tau) - E(\varepsilon^2(t))\right)\right] = 0, \forall \tau, \quad (5.9)$$

$$\phi_{\varepsilon^2\varepsilon^2}(\tau) = E\left[\left(\varepsilon^2(t) - E(\varepsilon^2(t))\right)\left(\varepsilon^2(t - \tau) - E(\varepsilon^2(t))\right)\right] = 0, \forall \tau, \quad (5.10)$$

$$\phi_{(y\varepsilon)u^2}(\tau) = E\left[\left(y(t)\varepsilon(t) - E(y(t)\varepsilon(t))\right)\left(u^2(t - \tau) - E(u^2(t))\right)\right] = 0, \forall \tau. \quad (5.11)$$

Em que,  $\varepsilon(t)$  e  $\delta(\tau)$  correspondem ao resíduo, calculado como sendo a diferença entre a saída do modelo e saída esperada, e o delta de Dirac, respectivamente e  $E[\ ]$  é operador matemático esperança. O modelo NARX desenvolvido neste trabalho foi aprovado, dentro de um critério de tolerância de 95% em todas as relações aqui apresentadas. Como dito, isto não é o suficiente para garantir que não haja polarização do modelo, mas pelo menos não indica que haja.



## 5.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste Capítulo foi apresentado o desenvolvimento, aprimoramento e validação de um modelo matemático para varistores de óxido de zinco.

De uma forma geral, o modelo desenvolvido representou bem a resposta do varistor a impulsos com diferentes tempos de frente e amplitudes, tendo um desempenho aceitável até em dados com o sinal de entrada de baixa qualidade.

A forma de onda da resposta e sua amplitude foram calculadas separadamente, de modo que, a rigor pode-se dizer que foram desenvolvidos dois modelos. Contudo, o cálculo da amplitude da tensão é consideravelmente mais simples do que o cálculo da forma de onda, o que é um aspecto positivo da modelagem desenvolvida, uma vez que, a maioria das aplicações de modelos para varistor é para os estudos de coordenação de isolamento e, nestes estudos, apenas a amplitude da tensão é relevante.

O procedimento para utilizar o modelo desenvolvido neste capítulo é o seguinte:

1. Montar a Eq. 5.2;
2. Compor um sinal para identificação dos parâmetros através de duas formas de onda de impulsos  $8/20 \mu\text{s}$ , com amplitudes diferentes;
3. Determinar os parâmetros da equação obtida no passo 1 para o vetor obtido no passo 2.
4. Utilizar valores de tensão residual para impulsos  $8/20 \mu\text{s}$  e  $4/10 \mu\text{s}$  para determinar os parâmetros de um plano  $t x i x v$  que será utilizado para determinar a amplitude do impulso.

O objetivo de utilizar apenas dados de impulsos com  $8 \mu\text{s}$  e  $4 \mu\text{s}$  de tempo de frente é permitir que o modelo seja determinado a partir de dados básicos que devem ser fornecidos pelo fabricante, infelizmente os dados providos pelo fabricante dos varistores utilizados neste trabalho são para um para-raios diferente do utilizado, o que impossibilitou o desenvolvimento de um modelo a partir de dados do *datasheet*.

O modelo desenvolvido neste trabalho foi ajustado para os dados obtidos a partir de um grupo de varistores idênticos. Não há motivo para acreditar que para varistores diferentes o modelo teria um desempenho muito diferente, contudo, é possível que se a base de dados for expandida seja necessário realizar uma nova seleção de regressores para contemplar outras dinâmicas, como por exemplo, a resposta a impulsos de polaridade negativa.

A validação do modelo desenvolvido mostra que, ele foi capaz de representar satisfatoriamente a amplitude e a forma de onda da resposta de um varistor, em toda a faixa de amplitude e tempo de frente analisada. Tendo em mente que o modelo foi construído a partir de sinais 8/20  $\mu$ s e 4/10  $\mu$ s, pode-se dizer que foram atingidos os objetivos traçados para o trabalho, restando apenas comparar o desempenho do modelo desenvolvido com os dos modelos tradicionais.

## CAPÍTULO 6

### ANÁLISE APROFUNDADA DO MODELO NARX

#### 6.1 INTRODUÇÃO

Até o presente foi discutido o desenvolvimento e validação de um modelo matemático para varistores de óxido de zinco. Contudo, para justificar o uso do modelo desenvolvido é importante avaliar as suas eventuais vantagens e desvantagens em relação aos modelos tradicionalmente utilizados.

No Capítulo 2 foram apresentados diferentes modelos para representar a característica dinâmica dos varistores de óxido de zinco. De uma forma geral, os modelos tradicionais de varistores propõem um circuito elétrico para modelar o comportamento do varistor. Ainda que a metodologia tenha suas limitações, representar o modelo como um circuito elétrico facilita a interpretação física de seus parâmetros.

Neste Capítulo, o desempenho de quatro dos modelos tradicionais, o modelo Convencional, IEEE, Pinceti e Magro, será comparado ao desempenho do modelo desenvolvido aqui, através dos mesmos critérios de avaliação utilizados no Capítulo anterior, R-Quadrado e precisão no valor de pico. Posteriormente, será realizada uma análise da resposta do modelo desenvolvido em função de variações nos seus parâmetros.

#### 6.2 DESEMPENHO DOS MODELOS TRADICIONAIS

Para comparar o modelo desenvolvido neste trabalho com os modelos tradicionais, tais modelos foram determinados utilizando os mesmos dados utilizados para determinar o modelo NARX desenvolvido neste trabalho.

Os modelos tradicionais foram implementados e simulados no *software* ATP, tradicionalmente utilizado na análise de transitórios. Na simulação foi utilizada como excitação para o circuito uma fonte que deveria injetar no modelo o vetor de corrente adquirido nos ensaios. Contudo, como mencionado no Capítulo 4, os dados obtidos nos

ensaios tinham bastante ruído e mesmo depois de filtrado, o ruído remanescente impedia que a simulação lograsse um bom resultado. Para contornar esse problema, foi preciso ajustar uma curva aos pontos do vetor de correntes.

A equação mais utilizada para representar sinais de impulso de corrente é a chamada dupla exponencial, que está apresentada na Eq. 6.1.

$$I(t) = I_p * (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}). \quad (6.1)$$

Onde,  $I_p$  é o valor de pico da corrente,  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros que controlam o tempo de frente e de cauda da onda, respectivamente. A Eq. 6.1 foi utilizada para ajustar os pontos do vetor de corrente obtido no ensaio. Na Fig. 6.1 apresenta-se uma comparação entre o sinal de corrente medido e o sinal interpolado.

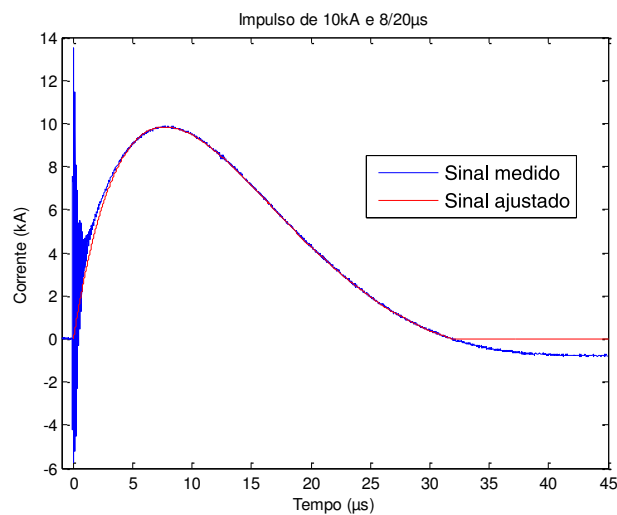
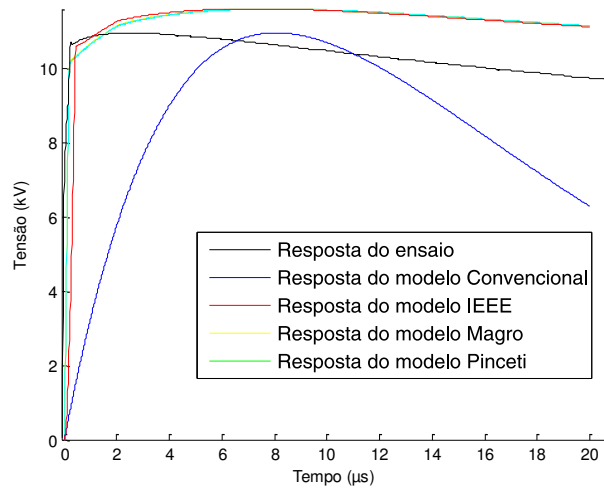


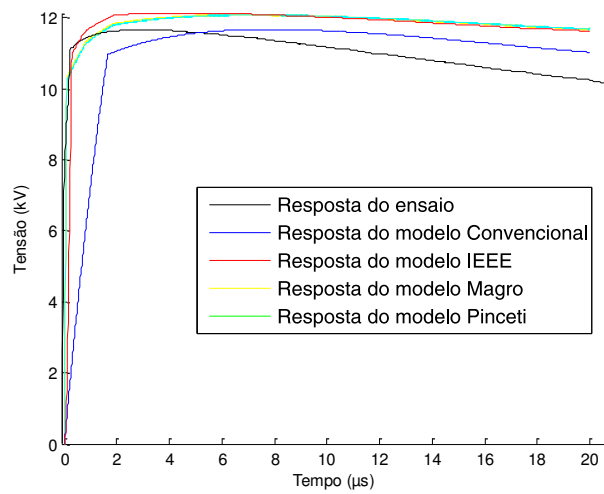
Fig. 6.1: Sinal de corrente tipo II com 10 kA, sinal medido e sinal ajustado com a Eq. 6.1.

Os parâmetros dos modelos foram determinados utilizando o procedimento sugerido por seus autores e sua estrutura foi implementada no *software* de simulação de transitórios ATP. Os resultados foram então exportados para o Matlab, para que pudessem ser avaliados e depois comparados com os resultados do modelo NARX. Assim, utilizando sinais de corrente interpolados, os modelos foram desenvolvidos e simulados.

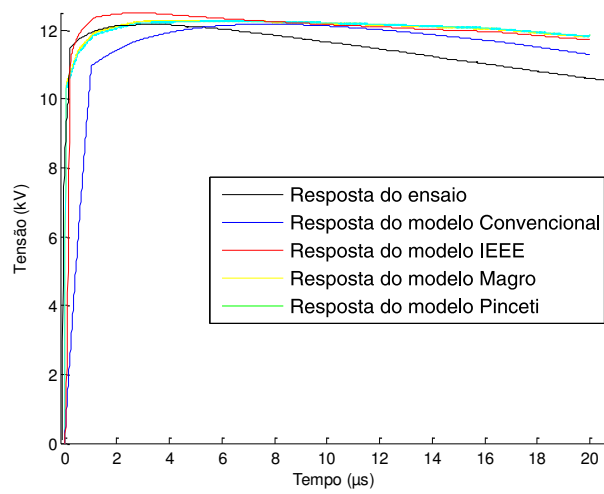
Os procedimentos de determinação de parâmetros destes modelos determinam que a identificação dos parâmetros deve utilizar o impulso padrão 8/20  $\mu$ s, que no caso deste trabalho corresponde ao sinal tipo II. Na Fig. 6.2 apresenta-se a resposta dos modelos tradicionais avaliados com este tipo de sinal. Nas Tabelas 6.1 a 6.4 apresenta-se dados estatísticos da resposta dos modelos tradicionais para sinais do tipo II e V.



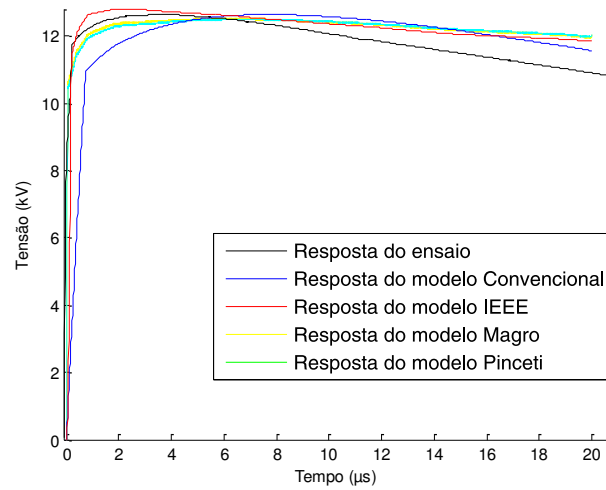
(a)



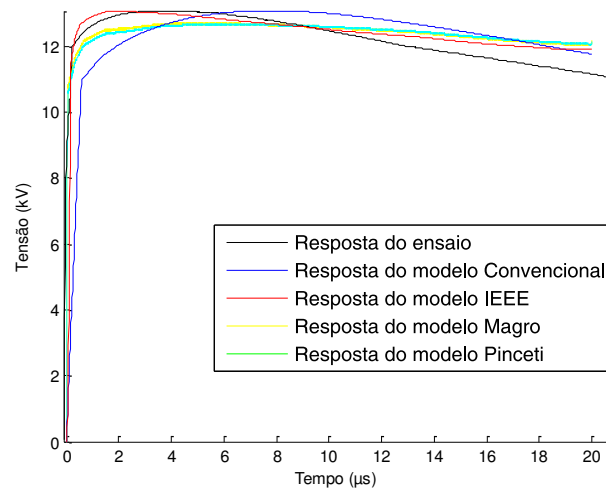
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 6.2: Resposta dos modelos tradicionais a um sinal tipo II com (a) 2 kA, (b) 4 kA, (c) 6 kA, (d) 8 kA e (e) 10 kA.

Tabela 6.1: Estatísticas de desempenho do Modelo IEEE.

<b>Tipo do impulso</b>	<b>Amplitude (kA)</b>	<b>R-Quadrado</b>	<b>Erro no valor de pico (%)</b>
V	2	0,7429	3,42
	4	0,8081	3,78
	6	0,8332	3,28
	8	0,8425	2,96
II	2	0,4783	5,92
	4	0,6392	3,95
	6	0,7212	2,83
	8	0,7915	1,36
	10	0,8154	-0,05

Tabela 6.2: Estatísticas de desempenho do Modelo Magro.

<b>Tipo do impulso</b>	<b>Amplitude (kA)</b>	<b>R-Quadrado</b>	<b>Erro no valor de pico (%)</b>
V	2	0,7567	3,11
	4	0,7272	0,86
	6	0,7229	-0,67
	8	0,7332	-2,60
II	2	0,6033	5,89
	4	0,6267	3,58
	6	0,6612	0,91
	8	0,7111	-0,89
	10	0,7476	-2,83

Tabela 6.3: Estatísticas de desempenho do Modelo Pinceti.

<b>Tipo do impulso</b>	<b>Amplitude (kA)</b>	<b>R-Quadrado</b>	<b>Erro no valor de pico (%)</b>
V	2	0,7431	3,06
	4	0,7038	0,71
	6	0,6950	-1,35
	8	0,7110	-3,48
II	2	0,5933	5,88
	4	0,6012	3,53
	6	0,6222	0,76
	8	0,6612	-1,02
	10	0,6899	-3,05

Tabela 6.4: Estatísticas de desempenho do Modelo Convencional.

<b>Tipo do impulso</b>	<b>Amplitude (kA)</b>	<b>R-Quadrado</b>	<b>Erro no valor de pico (%)</b>
V	2	0,3744	-2,92
	4	0,4683	-2,94
	6	0,5083	-2,83
	8	0,5626	-3,02
II	2	0,0954	$-14,65 \cdot 10^{-5}$
	4	0,1665	$-3,67 \cdot 10^{-5}$
	6	0,2844	$-3,14 \cdot 10^{-5}$
	8	0,3789	$0,22 \cdot 10^{-5}$
	10	0,4282	$-3,40 \cdot 10^{-5}$

Analisando os resultados apresentados na Fig. 6.2 é possível perceber que os modelos tradicionais não fazem uma boa representação da forma de onda da resposta do sinal, isso se confirma na observação dos melhores resultados do R-quadrado obtidos nas Tabelas 6.1 a 6.4, que é consideravelmente inferior ao pior desempenho do modelo NARX descrito na Tabela 5.1.



Concentrando a análise dos modelos na determinação da amplitude da resposta, o desempenho dos modelos tradicionais apresentados nas Tabelas 6.1 a 6.4 é condizente com os resultados apresentados nos trabalhos que os propuseram.

O procedimento de determinação de amplitude descrito no Capítulo 5 obteve resultados bastante próximos aos dos modelos tradicionais. Em ambos os casos a precisão na determinação da amplitude da resposta foi superior ao desvio entre varistores, indicando assim que a resposta, tanto dos modelos tradicionais quanto do modelo NARX, foi tão precisa quanto possível.

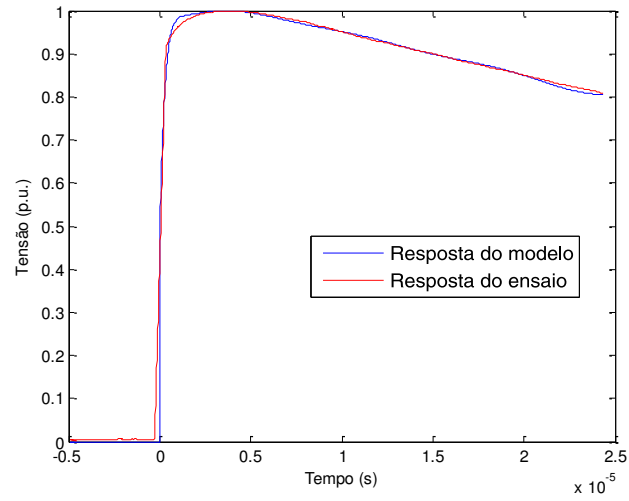
Analisando o resultado apresentado na Fig. 6.2, percebe-se que em todos os casos os modelos Pinceti e Magro apresentam respostas muito próximas, o que é perfeitamente esperado uma vez que o modelo Magro é uma variação do modelo Pinceti que por sua vez é uma simplificação do modelo IEEE.

Conforme esperado, o modelo convencional não representa a característica dinâmica do para-raios, de modo que sua resposta está em fase com a forma de onda da corrente. Contudo, em termos de amplitude, sua resposta apresenta uma precisão tão boa quanto à dos demais modelos. Os erros extremamente baixos na determinação da amplitude do sinal tipo II são inerentes ao processo de construção do modelo convencional, uma vez que, esses foram precisamente os dados utilizados para determinar seus parâmetros.

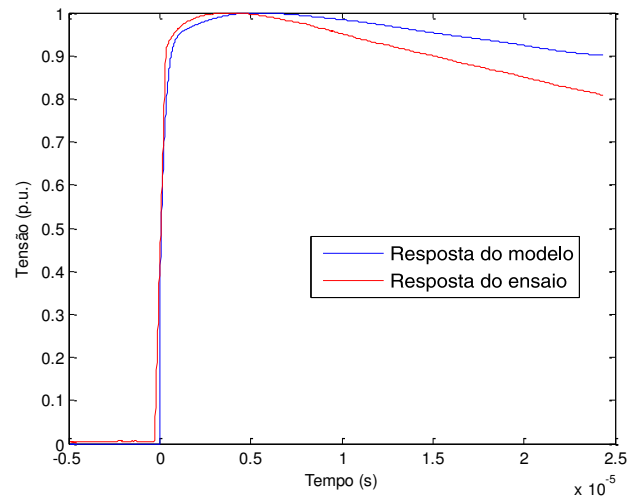
### 6.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO NARX

Para atribuir algum significado físico aos parâmetros de um modelo, é necessário entender como cada parâmetro do modelo afeta sua resposta. Para isso é realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo.

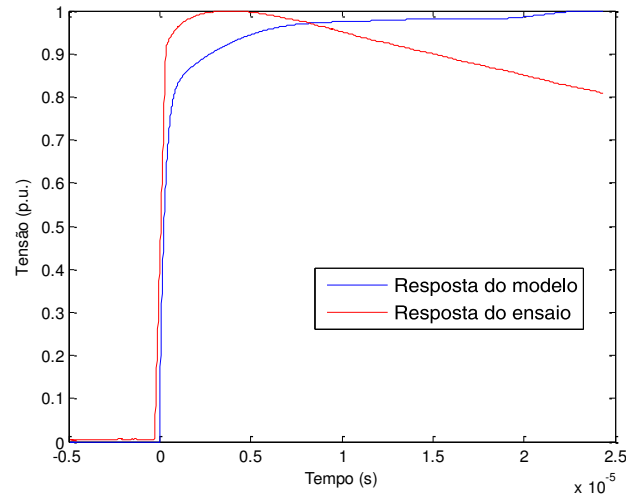
Existem técnicas e critérios para avaliação da sensibilidade de um modelo a um dado parâmetro. Na Fig. 6.3 apresenta-se um teste preliminar, onde o parâmetro de um dos regressores do modelo recebeu uma perturbação crescente.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.3: Resposta do modelo NARX a um sinal tipo II com 8 kA.(a) sem perturbação nos parâmetros, (b) perturbação de 1% em um dos parâmetros e (c) Perturbação de 10% em um dos parâmetros.

Se se calcular a estatística R-Quadrado para os resultados apresentados na Fig. 6.3 obtém-se 0,9819, 0,8254 e 0,5403, respectivamente. Percebe-se que, uma perturbação de apenas 1% em um dos 8 parâmetros é suficiente pra degenerar a resposta do modelo ao ponto de não ser mais uma representação aceitável para o varistor. Assim, uma equação para determinar os parâmetros do modelo em função de características físicas do varistor teria de ser bastante precisa para que o modelo pudesse ser aplicado.

A elevada sensibilidade dos parâmetros do modelo NARX não compromete seu desempenho de forma alguma, já que os parâmetros devem ser calculados com base na curva da resposta 8/20  $\mu$ s. Contudo, devido à elevada sensibilidade nos parâmetros, não é possível dar significado físico aos parâmetros do modelo, já que seria necessária extrema precisão em sua determinação e grandezas reais não tem essa característica.

Uma vez que não é possível dar significado físico aos parâmetros do modelo NARX, não faz sentido direcionar esforços em representá-lo na forma de um circuito elétrico, como são os modelos tradicionais.

## 6.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste Capítulo, o desempenho de alguns dos mais proeminentes modelos tradicionais foi comparado ao desempenho do modelo NARX. A comparação

evidenciou que, o modelo desenvolvido neste trabalho é capaz de realizar simulações mais fidedignas do comportamento de um varistor do que os modelos tradicionais. De uma forma geral, a forma de onda da resposta do modelo NARX está próxima dos resultados obtidos nos ensaios, enquanto que, a dos modelos tradicionais, não só é menos precisa como também tem seu desempenho bastante afetado pela amplitude e forma de onda da corrente.

Analisando a determinação isolada da amplitude da resposta, o desempenho do modelo proposto foi bastante similar ao desempenho dos modelos tradicionais, indicando que o procedimento proposto pode substituir ou ser utilizado em conjunto com os modelos tradicionais em estudos de coordenação de isolamento, desde que seja implementado em algum *software* de simulação de transitório como o ATP, tal implementação deverá ser realizada em trabalhos futuros.

É preciso levar em consideração que modelos tradicionais utilizam parâmetros determinados para um conjunto de medições, no caso do modelo IEEE, por exemplo, os parâmetros  $A_0$  e  $A_1$  são dados por uma tabela. De forma que, os modelos tradicionais podem responder bem para um determinado grupo de amostras, cujas características sejam próximas às utilizadas para determinar os parâmetros, e responder mal a amostras com características distintas. Este fato torna-se particularmente significativo se é levada em consideração os ensaios apresentados no Capítulo 4, onde amostras idênticas apresentavam respostas distintas de mais de 8% em relação à média e quase 16% distintas umas das outras. Assim, é razoável admitir que se as pastilhas não fossem idênticas, sua resposta seria ainda mais divergente, provavelmente, não só em amplitude mais também em forma de onda. O modelo apresentado neste trabalho não depende de dados tabelados ou mesmo da física envolvida no equipamento. Todos os seus parâmetros são determinados a partir da resposta a impulsos padronizados, 8/20 e 4/10  $\mu\text{s}$ . Assim, ele possui maior flexibilidade em sua resposta, de modo que, não há motivo para crer que seu desempenho iria variar significativamente para diferentes varistores ou mesmo para um para-raios completo.

Em comparação com os modelos tradicionais, a principal desvantagem do modelo NARX é a necessidade de pontos da tensão residual de impulsos 4/10  $\mu\text{s}$  na determinação da amplitude, enquanto para os modelos tradicionais a resposta 8/20  $\mu\text{s}$  é suficiente. Por outro lado, a desvantagem se transforma em vantagem em situações onde haja mais informação disponível, uma vez que, o desempenho do modelo proposto, tanto para o cálculo da forma de onda quanto para o cálculo de amplitude, pode ser

melhorado utilizando mais informação acerca do varistor. Enquanto que, nos modelos tradicionais não existe a possibilidade de incorporação de informação auxiliar ou conhecimento prévio para melhoria de desempenho.

Avaliações do efeito que perturbações nos parâmetros provocam na resposta do modelo NARX revelaram que, da forma como ele se encontra construído, não é possível dar significado físico a seus parâmetros devido à necessidade de elevada precisão de seus parâmetros.

Nas perspectivas de trabalhos futuros será apresentada uma alternativa para contornar este problema do modelo, mas no momento é importante lembrar que isto não afeta a aplicabilidade do modelo, apenas dificulta a interpretação de seus parâmetros.

## CAPÍTULO 7

# CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi construir um modelo que não tivesse as limitações dos modelos tradicionais, ou seja, um modelo que pudesse representar satisfatoriamente toda a forma de onda da resposta de um varistor para uma larga faixa de impulsos de corrente. Para atingir tal objetivo, buscou-se aplicar técnicas de identificação de sistemas para construir um modelo matemático do varistor. A seguir serão discutidas as conclusões que guiaram o processo de criação do modelo desenvolvido neste trabalho.

Depois de uma série de estudos preliminares, a construção do modelo se inicia com o planejamento e execução dos ensaios para formação da base de dados. Os ensaios foram planejados de forma a, dentro das possibilidades do gerador de impulso de corrente, representar a dinâmica do varistor em uma larga faixa de formas de onda e amplitudes.

Nos ensaios, verificou-se a mesma característica dinâmica dos varistores que é relatada em diferentes artigos, um adiantamento e elevação da forma de onda da tensão em consequência da redução do tempo de frente do impulso de corrente. Contudo, os dados obtidos são quantitativamente diferentes dos apresentados nas referências, indicando que, a amplitude da elevação da tensão é afetada pela microestrutura do varistor, que por sua vez é afetada por todo processamento, fato que é apoiado pela discrepância considerável na resposta entre amostras aparentemente idênticas.

Repetições nos ensaios conduziram a resultados idênticos, isso não só enfraquece a possibilidade dos resultados caracterizarem casos isolados, como também desencorajam o uso de estruturas estocásticas para modelar o comportamento do para-raios.

Também, a partir dos resultados dos ensaios, observou-se que a amplitude do impulso de corrente tem pouca ou nenhuma influência sobre a forma de onda da tensão. Tal observação motivou a criação de um modelo que calcula a amplitude e a forma de onda da tensão, separadamente.

A qualidade dos dados obtidos nos ensaios não foi constante, notadamente, os impulsos tipo III e IV apresentaram mais ruído do que os demais ensaios. As amostras utilizadas no desenvolvimento do modelo não apresentaram, nos testes de caracterização, envelhecimento significativo, de modo que a baixa qualidade dos dados dos ensaios tipo III e IV deve ser atribuída à geração do sinal em si e não à amostra ou a medição. O desempenho do modelo nas simulações das respostas a estes sinais de qualidade mais baixa naturalmente é inferior aos demais, mas ainda assim é aceitável e superior ao desempenho dos modelos tradicionais, mesmo em seus melhores casos, de modo que fica denotada a capacidade de generalização do modelo desenvolvido no trabalho.

Quando se obteve os primeiros dados dos ensaios, partiu-se em busca de uma estrutura para representá-los. Escolher a representação não é algo que possa ser feito rapidamente. Várias estruturas foram testadas e descartadas em diferentes etapas do desenvolvimento do modelo. Cita-se como exemplo a representação racional, que em alguns casos obteve resultados comparáveis ao modelo apresentado neste trabalho, mas foi reprovada na validação estatística. Assim, ao fim do trabalho, concluiu-se que a representação NARX era a mais adequada para representar o varistor.

Para que a representação NARX polinomial atingisse um desempenho adequado foram adotados os procedimentos descritos no Capítulo 5, de onde se concluiu que:

- É possível realizar uma caracterização mais adequada da dinâmica do varistor utilizando apenas sinais de 8  $\mu$ s de tempo de frente a partir da composição de um sinal de excitação artificial com 2 sinais de amplitudes distintas;
- Existem regressores espúrios no modelo e foi descrito um procedimento para identificá-los;
- A amplitude da forma de onda de tensão pode ser determinada a partir da amplitude e tempo de frente do sinal de corrente.

A aplicação das conclusões na estrutura NARX polinomial deu origem a um modelo estatisticamente válido capaz de representar com boa precisão e flexibilidade a resposta de um varistor a diferentes sinais de impulso de corrente.

A partir da análise dos parâmetros do modelo NARX, conclui-se que não é possível atribuir significado físico a seus parâmetros. Esta conclusão tem aspectos positivos e negativos. Por um lado, a inexistência de significado físico nos parâmetros limita a interpretação dos resultados, por exemplo, se os parâmetros tivessem significado físico, seria possível correlacionar a evolução dos parâmetros com o envelhecimento do varistor. Por outro lado, a inexistência de significado físico indica que o funcionamento do modelo não deve ser afetado por variações físicas do problema, como por exemplo, um grupo de varistores com comportamento anômalo.

Em comparação com os modelos tradicionais de varistores, o modelo desenvolvido mostrou-se uma representação mais fidedigna da forma de onda e uma representação equivalente da amplitude. Além disso, ao contrário dos modelos tradicionais, o modelo desenvolvido traz a possibilidade de incorporação de informação na determinação dos parâmetros, de modo que pode-se dizer que os resultados apresentados para o modelo NARX constituem o seu pior caso, podendo ser melhorado a partir do uso de mais dados na determinação de seus parâmetros.

## 7.2 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Todos os dados e análises realizadas neste trabalho foram concentradas na construção de um modelo matemático para varistores. A continuação natural do trabalho é estender a modelagem para um para-raios completo. Devido à natureza matemática do modelo, acredita-se não haverá maiores problemas na transição, mas sem dúvida ela é fundamental para aplicabilidade do modelo. Além disso, todos os algoritmos e rotinas utilizados foram implementados no ambiente Matlab. É importante realizar a implementação do modelo desenvolvido em um *software* utilizado nas simulações de transitórios, a exemplo do ATP.

Os dados disponíveis na realização deste trabalho caracterizam a resposta do varistor para impulsos rápidos, com tempos de frente próximos a 8  $\mu$ s, é importante avaliar o desempenho da estrutura proposta a impulsos com tempos de frente mais lentos, como surtos de chaveamento, por exemplo. Possivelmente, a análise irá suscitar mudanças no modelo proposto.

O modelo desenvolvido utiliza diretamente os dados de corrente e tensão como variáveis de entrada e saída. Existem vários trabalhos que mostram que realizar uma



extração de atributos nos dados disponíveis pode caracterizar melhor as informações de interesse, promovendo uma modelagem mais eficiente. A realização de extrações de atributos nos dados abre as portas para rever toda a modelagem realizada de modo que, estruturas que foram descartadas, como redes neurais por exemplo, podem superar o desempenho do modelo NARX polinomial proposto.

Os modelos tradicionais utilizam circuitos elétricos como estrutura. Este trabalho empregou uma estrutura de cunho genérico. Deve-se investigar o desempenho de modelos baseados em estruturas voltadas para a microestrutura do varistor, como, por exemplo, as equações de condução em semicondutores. Uma conexão como essa, entre a microestrutura do varistor e o funcionamento global do para-raios, não só pode contribuir para uma melhor compreensão do equipamento quanto dos complexos mecanismos de condução em um varistor.

As técnicas de identificação de sistemas foram empregadas com sucesso no desenvolvimento de um modelo para região de alta corrente do varistor. Outra continuação possível para o trabalho é aplicar as técnicas na determinação de um modelo para a região de baixa corrente. Em seguida, deve ser possível construir um modelo, ou grupo de modelos, que constitua uma representação geral de um para-raios.

Para melhorar a aceitação e aplicabilidade do modelo, é importante dar significado físico a seus parâmetros, para isso, é preciso desenvolver modelos menos sensíveis a perturbações nos parâmetros. Isso implica em um procedimento de determinação de parâmetros que inclua alguma restrição de robustez, seja ela matemática ou baseada em características operacionais do para-raios. O desenvolvimento de um modelo com parâmetros robustos abre uma grande quantidade de possibilidades de continuação para o trabalho, por exemplo: equacionar os parâmetros do modelo para atingir uma elevada precisão, contemplar o envelhecimento dos varistores e combinar o modelo matemático com os modelos tradicionais. Além disso, o desenvolvimento de um modelo matemático com significado físico para a região de baixa corrente pode fornecer ferramentas de monitoramento do para-raios.

Por fim, foram utilizados varistores idênticos na formação da base dados deste trabalho. É importante no futuro ampliar a base de dados para que ela contenha varistores com diferentes especificações e diferentes impulsos, como impulsos mais rápidos, mais lentos e de polaridade negativa. Espera-se com isso não só aumentar a confiabilidade do modelo desenvolvido mas também ampliar o conhecimento que se possui acerca da dinâmica dos varistores de uma forma geral.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, L. A. **Introdução a Identificação de Sistemas**. 2ª edição. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2004.
- AGUIRRE, L. A.; BILLINGS, S. A. Dynamical effects of overparametrization in nonlinear models. **Physica D**, 1995. 26-40.
- BAYADI, A; HARID, N; ZEHAR, K; BELKHIAT, S. **Simulation of Metal Oxide Surge Arrester Dynamic Behavior Under Fast Transients**. International Conference on Power System Transients – IPST. New orleans: [s.n.]. 2003.
- BILLINGS, S. A.; TAO, Q. H. Model validation tests for nonlinear signal processing applications. **International Journal of Control**, 1991. 157-194.
- BILLINGS, S. A.; VOON, W. S. F. Structure detection and model validity tests in the identification of nonlinear systems. **IEE Proceedings, Part D**, 1983. 193-199.
- BILLINGS, S. A.; VOON, W. S. F. Correlation based model validity tests for non-linear models. **International Journal of Control**, 1986. 235-244.
- BILLINGS, S. A.; ZHU, Q. M. Nonlinear model validation using correlation tests. **International Journal of Control**, 1994. 1107-1120.
- CHEN, S.; BILLINGS, S. A. Representation of non-linear systems: the NARMAX model. **International Journal of control**, 1989. 1013-1032.
- CHRISTODOULOU, C. A. ; EKONOMOU, L.; FOTIS, G.P.; KARAMPELAS, P.; STATHOPOULOS, I.A. **Parameters' optimisation for surge arrester circuit models**. IET Science, Measurement and Technology. [S.l.]: [s.n.]. 2009.
- CORRÊA, M. V. **Identificação de Sistemas dinâmicos não-lineares utilizando modelos NARMAX racionais - aplicação a sistemas reais**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas gerais( Dissertação de metrado, PPGEE), 1997.
- CORRÊA, M. V.; AGUIRRE, L. A.; SALDANHA, R. R. Using Steady-State prior knowledge to constrain parameter estimates in nonlinear system identification. **IEEE transactions Circ. Sist.**, v. 49, n. (9), 2002. ISSN 1376-1381.
- FERNÁNDEZ, F.; DÍAZ, R. Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations. **International conference on power system transients IPST'01**, Rio de Janeiro, 20-24 June 2001. 144.
- HILEMAN, R.; ROGUIN, J.; WECK, K. H. Metal oxide surge arresters in AC systems - Part V: Protection performance of metal oxide surge arresters. **Electra**, 1990. 132-144.
- HINRICHSEN, V. **Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals**. 1ª Edição. ed. Berlim: Siemens – Power Transmission and Distribution Power Voltage Division, 2001.

IEEE 3.4.11, W. G. A. O. S. P. D. S. Modeling of metal oxide surge arresters. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 7 , Issue:1, Janeiro 1992. 302-309.

IEEE, P. E. S. **IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (> 1 kV)**. New York: IEEE, 2005.

KARBALAYE, Z.; ABNIKI , H.; SHAYEGANI , A. A. A. **The Modeling of Metal-Oxide Surge Arrester Applied**. 2th International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System. [S.l.]: [s.n.]. 2009.

KIM, I. et al. Study of ZnO arrester model for steep front wave. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11 , Issue:2 , p. 834 - 841, Abril 1996.

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, Julho 2002.

LIRA, G. R. S. **Estimação de Parametros para um modelo dinâmico de Para-Raios de óxido de zinco**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, (Dissertação de mestrado em engenharia elétrica), 2008.

LJUNG, L. **System identification - Theory for the user**. 2ª edição. ed. New Jersey: Prentice-hall, 1987.

MAGRO, M. C.; GIANNETTONI, M.; PINCETI, P. Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19 , Issue:4 , p. 1692 - 1695 , Outubro 2004.

NELLES, O. **Nonlinear System identification**. 1. ed. Berlin: Springer, 2001.

NORTON, J. P. **An introduction to identification**. 1ª edição. ed. Orlando: Academic Press, 1986.

PINCETI, P.; GIANNETTONI, M. A simplified model for zinc oxide surge arresters. **Power Delivery, IEEE Transactions**, v. 14, Issue 2., p. 393 - 398, Abril 1999.

SCHMIDT, W. et al. Behaviour of MO-surge-arrester blocks to fast transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4 , Issue:1 , p. 292-300, Janeiro 1989.

SILVEIRA, J. **Modelagem e Análise De Varistores De Óxido Metálico De Zinco**. FLORIANÓPOLIS: [s.n.], 2009.

TOMINAGA, S.; AZUMI, K.; SHIBUYA, Y.; IMATAKI, M.; FUJIWARA, Y.; NICHIDA, S.. Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic v-i characteristics. **IEEE Trans. Power App. Syst**, 1979. 1860-1871.

ZHU, H.; RAGHUVEER, M. R. **Influence of Harmonics in System Voltage on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics**. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: [s.n.]. 1999.