

METODOLOGIA E PROGRAMA PARA DECOMPOSIÇÃO DA CORRENTE  
DE FUGA DE PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

Paulo Fernando de Matos Araujo

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO  
ELETRICISTA.

Aprovado por:

---

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D

---

Eng. Orsino Borges de Oliveira Filho, M.Sc.

---

Prof. Ivan Herszterg, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO DE 2010

de Matos Araujo, Paulo Fernando

Metodologia e programa para decomposição da corrente de fuga de pára-raios de Óxido de Zinco/Paulo Fernando de Matos Araujo. – Rio de Janeiro: UFRJ/POLI/DEE, 2010.

XI, 59 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Sergio Sami Hazan

Co-Orientador: Orsino Borges de Oliveira Filho

Projeto (engenheiro eletricista) –  
UFRJ/POLI/Departamento de Engenharia Elétrica,  
2010.

Referências Bibliográficas: p. 50 – 51.

1. Pára-raios de ZnO. 2. monitoramento. 3.  
decomposição da corrente. 4. corrente resistiva. 5.  
série de Fourier. I. Sami Hazan, Sergio *et al.* II.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica,  
Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

# Agradecimentos

Agradeço ao Orsino Borges de Oliveira Filho pela oportunidade de estágio e por toda ajuda na condução deste trabalho; ao Carlos Eduardo Rodrigues Pereira por me ajudar com o  $\text{\LaTeX}$ ; ao André Tomaz de Carvalho pelas apostilas do LabVIEW; ao Flávio Bittencourt Barbosa pela revisão e dados fornecidos para o trabalho; e a todos do CEPTEL que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo do Projeto apresentado ao DEE/POLI/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

## METODOLOGIA E PROGRAMA PARA DECOMPOSIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA DE PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

Paulo Fernando de Matos Araujo

Janeiro/2010

Orientador: Sergio Sami Hazan

Co-Orientador: Orsino Borges de Oliveira Filho

Departamento de Engenharia Elétrica

O pára-raios, como equipamento de proteção contra sobretensões, está presente em todas as subestações de sistemas elétricos de potência nos níveis de tensão utilizados na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Os pára-raios atuais são formados essencialmente por resistores altamente não-lineares a base de óxido de zinco (ZnO) e alcançaram elevados níveis de confiabilidade. No entanto, por estarem continuamente energizados, eles podem sofrer alterações ao longo do tempo que podem afetar seu desempenho quando da ocorrência de sobretensões. Para ser assegurado que um pára-raios instalado no sistema está em condições de realizar a sua função de proteção contra sobretensões em qualquer momento, é recomendável que o seu desempenho seja monitorado continuamente ou freqüentemente. Neste trabalho são apresentadas informações sobre a evolução dos pára-raios até chegar aos atuais, suas principais características, técnicas para avaliação de desempenho e uma metodologia desenvolvida juntamente com um programa computacional para aplicá-la no monitoramento dos pára-raios de ZnO. A metodologia desenvolvida mostrou-se adequada sobretudo para a necessidade mais comum nesse tipo de monitoramento, que ocorre com o pára-raios submetido à sua tensão contínua de operação. São apresentados resultados de aplicação da metodologia implementada num programa computacional, em ensaios de alta tensão realizados em laboratório.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>x</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Pára-raios de ZnO</b>	<b>3</b>
2.1 Evolução . . . . .	4
2.1.1 Centelhador entre Fase e Terra . . . . .	5
2.1.2 Pára-raios de SiC com centelhador . . . . .	5
2.1.3 Pára-raios de SiC com centelhador ativo . . . . .	6
2.1.4 Pára-raios de ZnO . . . . .	6
2.2 Propriedades do bloco de ZnO . . . . .	8
2.2.1 Propriedades básicas . . . . .	8
2.2.2 Circuito equivalente . . . . .	10
2.3 Características do Pára-raios de ZnO . . . . .	11
2.3.1 Definições padrões de parâmetros importantes . . . . .	11
2.3.2 Classificação de pára-raios de ZnO . . . . .	12
2.3.3 Outras características importantes . . . . .	13
2.4 Desempenho térmico . . . . .	13
2.4.1 Capacidade de dissipação de calor e estabilidade térmica . . . . .	14
2.4.2 Avalanche térmica . . . . .	17
2.5 Degradação e envelhecimento . . . . .	18
2.5.1 Diferenças entre degradação e desempenho térmica . . . . .	18
2.5.2 Fatores que afetam a taxa de degradação . . . . .	19
2.5.3 Mecanismo de destruição . . . . .	20

2.6	Estimativa do tempo de vida . . . . .	21
2.6.1	Ensaios de envelhecimento acelerado . . . . .	21
2.6.2	Teoria de Dakin-Arrhenius . . . . .	22
2.7	Procedimentos de ensaios para caracterização do pára-raios de ZnO . . . . .	22
2.7.1	Regime pré-descarga . . . . .	22
2.7.2	Regime de descarga e região de altas correntes . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Monitoramento</b>	<b>25</b>
3.1	Medição da curva característica $V-I$ . . . . .	25
3.2	Medição da potência . . . . .	26
3.3	Medição de radiointerferência . . . . .	27
3.4	Medição de descargas parciais . . . . .	27
3.5	Terceiro harmônico da corrente de fuga . . . . .	27
3.6	Termovisão . . . . .	27
3.7	Obtenção da componente resistiva da corrente . . . . .	28
3.7.1	Circuito com capacitor de alta tensão . . . . .	29
3.7.2	Ensaios com tensões próximas da $V_c$ . . . . .	30
3.7.3	Proposta do trabalho . . . . .	31
<b>4</b>	<b>DecomPR</b>	<b>32</b>
4.1	Metodologia . . . . .	33
4.2	Validação do programa . . . . .	35
4.2.1	Dados de simulação . . . . .	35
4.2.2	Dados reais . . . . .	38
4.2.3	Outros resultados . . . . .	39
4.3	Comparação do resultado do programa com método anterior . . . . .	45
4.4	Outras funções do programa . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>48</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>50</b>
<b>A</b>	<b>Manual</b>	<b>52</b>
A.1	Requisitos . . . . .	52
A.2	DecomPR . . . . .	52

A.2.1	Menu Principal . . . . .	53
A.2.2	Menu de visualização dos Sinais . . . . .	56
A.2.3	Medições e Resultados processados . . . . .	57
A.2.4	Outras informações . . . . .	58

# Lista de Figuras

2.1	Relação amplitude x tempo de duração da tensão . . . . .	4
2.2	Esquemas de diferentes etapas da evolução dos pára-raios. . . . .	5
2.3	Característica $V-I$ dos materiais de ZnO e SiC . . . . .	8
2.4	Blocos de ZnO usados nos pára-raios . . . . .	9
2.5	Fotomicrografia de um bloco de ZnO . . . . .	10
2.6	Circuito equivalente do ZnO . . . . .	11
2.7	Efeito da temperatura na curva $V-I$ para baixas correntes . . . . .	15
2.8	Gráfico da estabilidade térmica . . . . .	16
2.9	Corrente para uma tensão no início da curva $V-I$ . . . . .	23
2.10	Corrente para uma tensão no fim da primeira região da curva $V-I$ . . . . .	24
2.11	Esquema simples de um ensaio de pára-raios de ZnO com impulsos. . . . .	24
3.1	Exemplo de curva $V-I$ construída com diferentes ensaios. . . . .	26
3.2	Exemplos de termogramas . . . . .	28
3.3	Circuito para medição da corrente resistiva. . . . .	30
3.4	Corrente resistiva obtida em ensaio com circuito capacitivo. . . . .	31
4.1	Etapas da função principal. . . . .	35
4.2	Circuito RC da simulação. . . . .	36
4.3	Sinais da simulação usados como entrada no programa. . . . .	37
4.4	Resposta do programa para os sinais da simulação. . . . .	37
4.5	Sinais do ensaio de pára-raios usados como entrada. . . . .	38
4.6	Resposta do programa para os sinais do ensaio de pára-raios. . . . .	39
4.7	Correntes para uma tensão eficaz de 3kV. . . . .	40
4.8	Correntes para uma tensão eficaz de 3,6kV. . . . .	41
4.9	Correntes para uma tensão eficaz de 3,8kV. . . . .	42



4.10	Correntes para uma tensão eficaz de 4kV. . . . .	43
4.11	Correntes para uma tensão eficaz de 4,2kV. . . . .	44
4.12	Primeira comparação de correntes resistiva. . . . .	46
4.13	Segunda comparação de correntes resistiva. . . . .	47
A.1	Interface do programa. . . . .	53
A.2	Menu principal. . . . .	53
A.3	Janela de Configurações . . . . .	54
A.4	Menu de visualização dos Sinais. . . . .	56
A.5	Gráficos e mostradores. . . . .	57
A.6	Menu de opções para um gráfico. . . . .	58
A.7	Opções de exportação dos gráficos como imagens. . . . .	59

# Lista de Símbolos

$C$	Capacitor, p. 10
$E$	Campo elétrico, p. 7
$I$	Corrente, p. 4
$I_c$	Corrente capacitiva, Componente capacitiva da corrente de fuga, p. 35
$I_f$	Corrente de fuga, p. 11
$I_r$	Corrente resistiva, Componente resistiva da corrente de fuga, p. 35
$J$	Densidade de corrente, p. 7
$R$	Resistor, p. 10
$V$	Tensão, p. 4
$\alpha$	Coefficiente de não-linearidade, p. 4
$Al_2O_3$	Óxido de Alumínio, p. 11
$BaO$	Óxido de Bário, p. 11
$Bi_2O_3$	Óxido de Bismuto, p. 11
$CaO$	Óxido de Cálcio, p. 11
$CoO$	Monóxido de cobalto, p. 11
$Cr_2O_3$	Óxido de Crômio (III), p. 11

$K_2O$	Óxido de Potássio, p. 11
$MnO$	Óxido de manganês (II), p. 11
$SiC$	Carboneto de silício, p. 1
$SiO_2$	Óxido de Silício, p. 11
$SrO$	Óxido de Estrôncio, p. 11
$ZnO$	Óxido de Zinco, p. 1

# Capítulo 1

## Introdução

Um bom sistema elétrico de potência precisa ser confiável, principalmente no caso de um sistema regulamentado sujeito a pesadas multas por indisponibilidade, como é o sistema elétrico brasileiro. Para atender a critérios aceitáveis de confiabilidade em um grande sistema interligado em um país com grande incidência de descargas atmosféricas como o Brasil, é extremamente importante ter uma proteção adequada dos equipamentos para sobretensões transitórias.

Durante sobretensões de origem atmosférica ou de manobra, os pára-raios são essenciais para limitar o nível de tensão que poderia causar danos nos equipamentos, permitindo que estes possam continuar operando e mantendo o suprimento de energia pelo sistema.

O equipamento pára-raios surgiu como um simples centelhador e teve um grande desenvolvimento no decorrer do século passado, melhorando seu desempenho e causando uma redução de custos nos equipamentos que são protegidos por ele ao possibilitar a redução dos isolamentos necessários. Nas últimas décadas, o surgimento do pára-raios de ZnO com propriedades superiores às do SiC renovou o interesse e aumentou o uso de pára-raios.

Pára-raios de ZnO são equipamentos mais confiáveis que seus antecessores, mas suas condições de operação, por estarem continuamente energizados e considerando a imprevisível quantidade de sobretensões que deverão limitar em um período de tempo, não garantem por quanto tempo cada pára-raios estará em boas condições para atuar na próxima sobretensão.

Desta forma, monitoramentos são realizados continuamente ou freqüentemente,

dependendo da importância do equipamento que está sendo protegido, para verificar o estado de operação de pára-raios. O objetivo deste trabalho foi criar um programa para auxiliar nesta verificação, por meio da aquisição e processamento da corrente de fuga e da tensão aplicada nos pára-raios, com uma metodologia desenvolvida juntamente com um programa computacional para aplicá-la na separação da componente resistiva da corrente de fuga de pára-raios de ZnO. Essa separação da componente resistiva é de interesse para o monitoramento da potência ativa, a qual está associada à degradação das características dos resistores de ZnO que podem impactar o desempenho do pára-raios.

O LabVIEW é um ambiente de programação gráfica que possui vantagens para aquisição e manipulação de dados. Foi neste ambiente que o programa de decomposição da corrente de fuga foi elaborado.

A seguir são apresentadas informações sobre os pára-raios de ZnO, sua evolução e principais características, exemplos de monitoramento, bem como o programa computacional desenvolvido para o processamento da corrente de fuga e sua aplicação em laboratórios de alta tensão.

# Capítulo 2

## Pára-raios de ZnO

Pára-raios de ZnO é um equipamento de grande importância para garantia da confiabilidade no sistema elétrico. Na ocorrência de uma sobretensão de manobra ou atmosférica, um pára-raios operando normalmente limita a tensão sobre outro equipamento que, desta forma, não sofrerá com a sobretensão, não terá seu funcionamento interrompido e o sistema continuará operando normalmente após a passagem do surto de tensão.

O custo dos pára-raios é apenas uma fração dos equipamentos que eles protegem, sendo mais vantajoso utilizá-los do que ter equipamentos com um nível de isolamento muito maior para suportar os surtos, caracterizando uma vantagem econômica, sobretudo considerando o impacto financeiro da proteção que eles proporcionam[1].

A figura 2.1 [2] apresenta uma estimativa de diferentes níveis de tensão que podem ocorrer para eventos de diferentes durações junto com o nível de tensão suportada pelos equipamentos e o papel do pára-raios em limitar as tensões de surtos. Nela é mostrado que sem a utilização dos pára-raios, ou os equipamentos não iriam suportar surtos de manobra e atmosféricos ou então que o nível de isolamento dos equipamentos teria que ser muito maior, aumentando os seus custos.

O pára-raios ideal seria capaz de não conduzir com tensões até a nominal do sistema, iniciando a condução apenas na ocorrência de uma tensão com uma margem acima da nominal, mantendo esta tensão em um nível de proteção durante o surto e interrompendo a condução assim que a tensão voltasse a ser próxima à nominal, voltando a ser isolante. [1, 3]

Um pára-raios de ZnO tem um comportamento próximo ao ideal durante a

condução, por possuir uma grande não linearidade que permite a manutenção da tensão em níveis baixos enquanto que para tensões normais de operação, a condução por ele é insignificante. A relação básica entre a tensão  $V$  e a corrente  $I$  dos pára-raios é dada pela fórmula não-linear:

$$I = kV^\alpha \quad (2.1)$$

onde  $k$  é uma constante e  $\alpha$  é o coeficiente de não-linearidade.

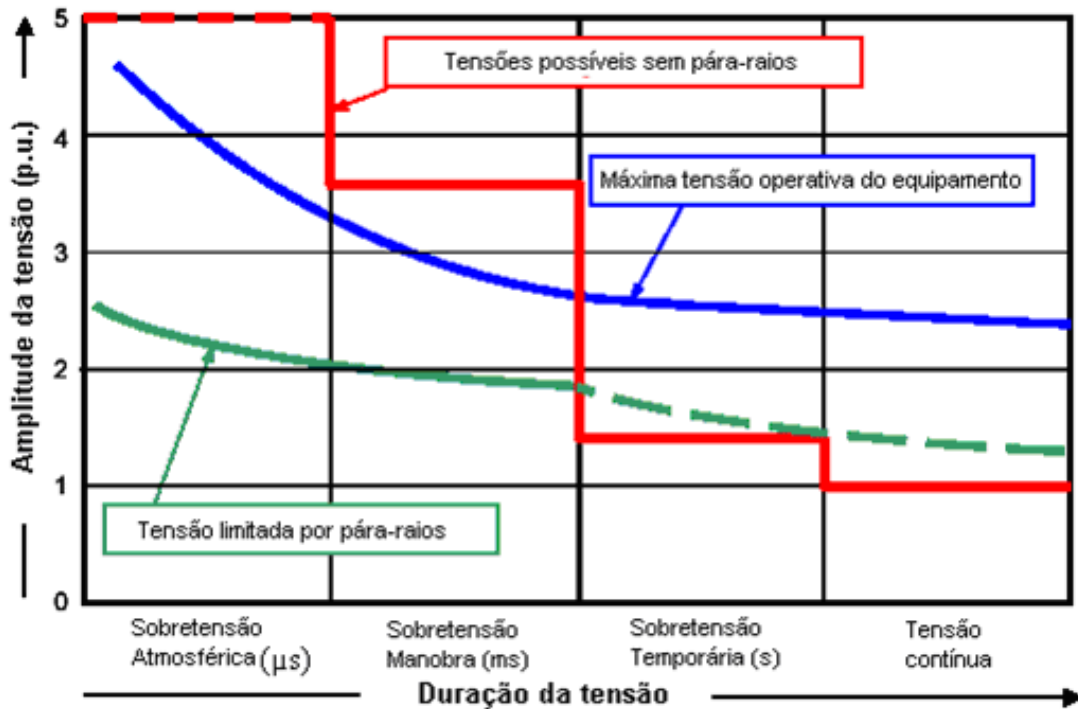


Figura 2.1: Relação amplitude x tempo de duração da tensão

A seguir, são apresentadas características do pára-raios de ZnO, começando pelo processo de evolução.

## 2.1 Evolução

A evolução dos pára-raios teve quatro principais etapas em seu desenvolvimento. Iniciou com um simples centelhador passando pela descoberta do resistor não-linear de SiC, até chegar ao resistor não-linear de ZnO. Esquemas de diferentes modelos no processo de evolução dos pára-raios são mostrados na figura 2.2 [1].

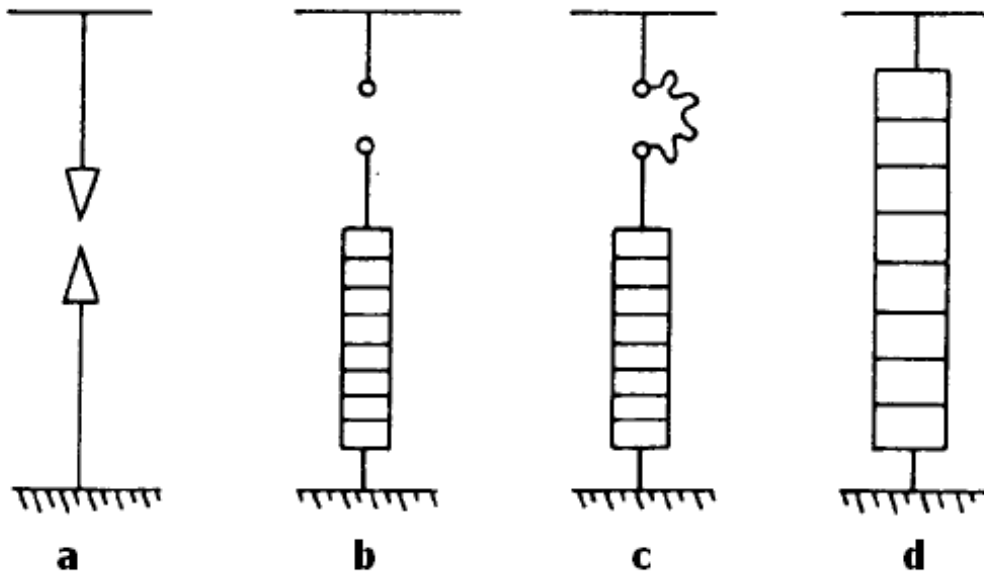


Figura 2.2: Esquemas de diferentes etapas da evolução dos pára-raios. a) Centelhador entre Fase e Terra; b) Pára-raios de SiC com centelhador; c) Pára-raios de SiC com centelhador ativo; d) Pára-raios de ZnO

### 2.1.1 Centelhador entre Fase e Terra

As vantagens do centelhador (figura 2.2-a) eram a sua simplicidade e seu baixo custo. O centelhador era ajustado para suportar a tensão de operação. Na ocorrência de uma sobretensão um arco era formado no centelhador e a tensão era limitada. Porém o arco forma um curto-circuito fase-terra que se mantém mesmo após a passagem do surto, sendo necessário a atuação da proteção para eliminar o curto, causando a descontinuidade de serviço do equipamento que foi protegido e não evitava uma perda temporária[3].

### 2.1.2 Pára-raios de SiC com centelhador

A descoberta das propriedades não-lineares do SiC tornou possível a construção de pára-raios capazes de interromper a corrente que era conduzida após o surto, chamada corrente subsequente de frequência nominal. Esses pára-raios são chamados do tipo válvula por permitir a condução em sobretensões e restaurar as condições iniciais após o surto. Sua construção era basicamente de centelhadores em série com blocos de SiC (figura 2.2-b). Em tensões normais, os centelhadores



suportariam a tensão e permitiam o disparo, iniciando a condução, apenas quando houvesse uma sobretensão enquanto os elementos de SiC atuavam para limitar a corrente. A limitação da corrente subsequente permite o interrompimento da condução quando a tensão na frequência nominal passa por zero[3].

Em relação à etapa anterior, este modelo já não causava a descontinuidade de serviço, mas seus níveis de proteção (ou seja, a tensão durante a descarga nos equipamentos protegidos) ainda eram muito elevados.

### **2.1.3 Pára-raios de SiC com centelhador ativo**

Com o crescimento das tensões dos sistemas a evolução chegou a uma nova etapa. Produzindo um forte campo magnético durante a passagem da corrente, os arcos formados nos centelhadores são alongados (figura 2.2-c), o que deu o nome de centelhador ativo. O alongamento do arco resulta em uma queda de tensão maior, diminuindo a tensão nos resistores não-lineares, resultando numa corrente menor e permitindo a interrupção após a passagem da sobretensão, mesmo antes da tensão passar por zero.

Em relação à etapa anterior, este modelo tem uma tensão residual menor e a energia absorvida pelos resistores é menor por causa do arco alongado e por interromper a condução da corrente subsequente em menos tempo.

Os pára-raios de SiC, no entanto, não eram confiáveis, pois tinham desempenho dependente de muitos componentes presentes em torno dos centelhadores e dos resistores de SiC, que não tinham uma não-linearidade tão acentuada quanto era desejável[3].

### **2.1.4 Pára-raios de ZnO**

Com o aumento do nível de tensão dos sistemas, a proteção relativamente alta do pára-raios com SiC se tornava menos vantajosa economicamente e a utilização de centelhadores gerava uma variação muito brusca da tensão nos terminais do equipamento que estava sendo protegido. A procura por níveis menores de proteção e por materiais com uma relação  $V-I$  mais não-linear levou à descoberta do ZnO. Enquanto o coeficiente de não-linearidade do SiC era da ordem de 4, o coeficiente dos primeiros ZnO estava entre 25 e 50.

Por apresentar uma impedância muito elevada para tensões abaixo da nominal, a corrente que passa pelos elementos de ZnO é, no máximo, da ordem de miliampere, o que permitiu a eliminação do centelhador para a construção desses pára-raios, ficando uma construção formada basicamente pelos blocos de ZnO conectados em série (figura 2.2-d).

Em relação ao modelo anterior, este é mais simples, eliminando centelhadores e o mecanismo de alongamento de arco, aumentando sua confiabilidade; o nível de proteção também é mais bem definido pela ausência de centelhador; maior capacidade de absorção de energia; transição mais suave entre a corrente de descarga e o nível normal em miliampere[1, 3].

Assim, o ZnO substituiu o SiC em pára-raios desde a década de 60 e vem sendo usado em outras aplicações como supressor de tensões baixas em equipamentos eletrônicos e aparelhos domésticos, variados esquemas de proteção contra tensões e correntes elevadas.

Com o uso em variadas aplicações, diferentes possibilidades surgiram procurando melhorias como:

- Técnicas de solda para melhorar a resistência mecânica[3];
- Uso de capacitores para controlar a distribuição da tensão pela coluna de blocos[3];
- Melhores características  $E-J$  ou  $V-I$  do material, permitindo reduzir o tamanho da coluna de blocos e melhorar a distribuição da tensão[3, 4];
- Regras especiais para a condição e ambiente de instalação[3];
- Invólucro feito com polímero substituindo a porcelana, permitindo melhorias no mecanismo de alívio de pressão, menos perigo em casos de falha do equipamento seguida de explosão e reduzindo o peso do equipamento;
- Sistema de cintos envolvendo os blocos procurando evitar que, em caso de fragmentação, ocorra uma grande quantidade de fragmentos arremessados para longe do equipamento em falhas.

## 2.2 Propriedades do bloco de ZnO

### 2.2.1 Propriedades básicas

As propriedades semicondutoras do ZnO eram conhecidas desde 1951, mas foi em 1969 que foi encontrada a característica não-linear do ZnO dopado com óxidos de metais alcalinos-terrosos. Com uma quantidade apropriada de aditivos, o coeficiente não-linear é extremamente maior que o coeficiente encontrado nos resistores não-lineares de SiC[3].

Exemplos de relações  $V-I$  para materiais de SiC e ZnO são apresentadas na figura 2.3[5] onde fica clara a diferença entre as não-linearidades dos materiais e permite observar o porque do ZnO possibilitar a construção de pára-raios sem centelhadores apresentando uma corrente extremamente baixa para a tensão de operação. A figura também mostra que não existe apenas uma equação como a 2.1 para descrever a curva. Normalmente a curva é dividida em 3 regiões: uma para baixas correntes, o chamado de joelho de condução por volta da tensão nominal, a segunda para a região de grande não linearidade e a terceira para a região de altas correntes.

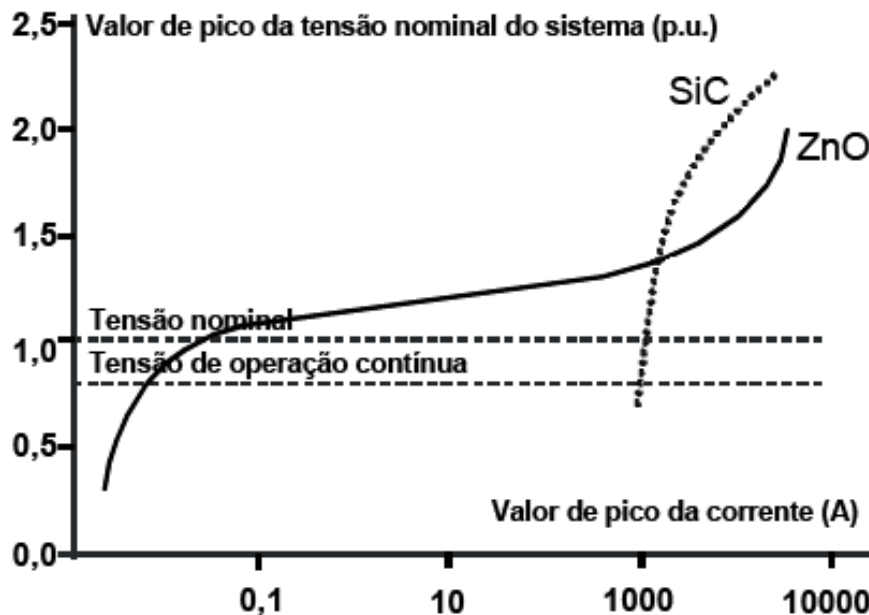


Figura 2.3: Característica  $V-I$  dos materiais de ZnO e SiC

A adição de outros dopantes permitiu aos fabricantes alterar o tamanho do grão de ZnO, a capacidade de absorção de energia, a tensão residual, a corrente de fuga, a estabilidade térmica, a tensão de proteção e até a expectativa de vida.

A fabricação de ZnO em blocos tem um processo extremamente controlado e com tempos definidos pelos fabricantes para cada etapa.

Um dos processos utilizados é dividido nas seguintes etapas: ZnO com grande pureza e em pequenos cristais é misturado com os dopantes selecionados em pó com água (ou álcool); a mistura é secada em um processo de calcinação a 700°C; e então compactada para a formação dos blocos; que passa por um processo de sinterização a 1000-1400°C; após o resfriamento, é adicionado na superfície periférica um material isolante (vidro ou epoxy), em cada face são depositados eletrodos metálicos e os blocos estão prontos para ensaios de rotina antes da construção dos pára-raios. A figura 2.4 [4] mostra dois blocos, que apesar da diferença de tamanho, possuem a mesma tensão nominal.



Figura 2.4: Blocos de ZnO usados nos pára-raios

O processo é fundamental para a formação da microestrutura que basicamente é composta pelos grãos de ZnO com alguns dopantes fundidos nos grãos que são separados por uma camada intergranular que contém os outros dopantes utilizados, mostrada na figura 2.5 [3].

O mecanismo de condução é explicado baseado nessa microestrutura, onde a tensão de operação aplicada é distribuída pelas camadas intergranulares, que possuem uma resistividade de  $10^{10} \Omega \text{ cm}$ . Conforme a tensão passa para a segunda região da curva  $V-I$ , a resistividade das camadas diminui acentuadamente até que na região de altas correntes a queda de tensão ocorre basicamente nos grãos de ZnO, de resistividade de 1 a  $10 \Omega \text{ cm}$ [3].

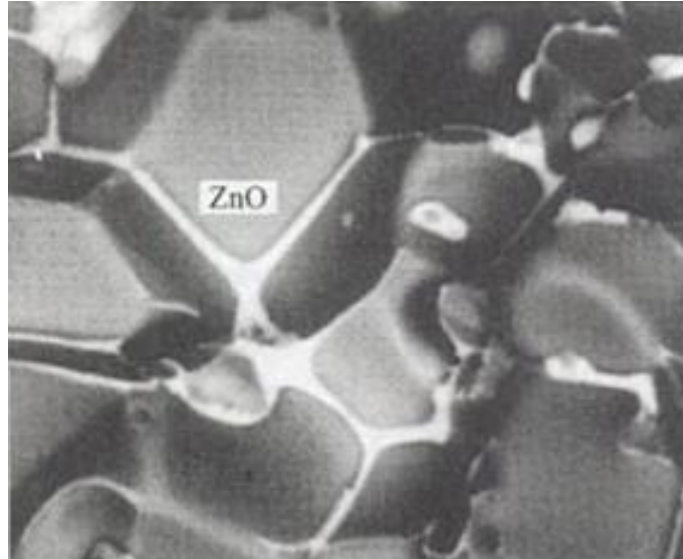


Figura 2.5: Fotomicrografia de um bloco de ZnO

Alguns dopantes e seus efeitos quando combinados com o ZnO são mostrados na tabela 2.1 [3].

Tabela 2.1: Exemplos de dopantes e seus efeitos

<i>Dopantes</i>	<i>Efeitos</i>
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + metais alcalinos: CaO, CoO, BaO, SrO, MnO	Aparece a não-linearidade Maior $\alpha$ com BaO
K <sub>2</sub> O	Inibe o crescimento do grão
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Diminui a tensão residual Aumenta o crescimento do grão Aumenta a corrente de fuga $\alpha$ elevado
SiO <sub>2</sub>	Diminui corrente de fuga
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Melhora a estabilidade térmica

### 2.2.2 Circuito equivalente

Para facilitar a aplicação, um circuito equivalente deve ser o mais simples possível sem deixar de ser uma boa representação, e servir como modelo do pára-raios de ZnO.

O modelo mais simples, usado em engenharia, é um circuito  $R$ - $C$  (figura 2.6) em

paralelo, onde  $R$  é definido como altamente não-linear conforme a tensão aumenta, enquanto  $C$  tem um comportamento não-linear mais brando[3]. Ainda na figura,  $I_f$  é a corrente de fuga total que também é a soma de  $I_r$  e  $I_c$ , corrente resistiva e capacitiva, respectivamente.

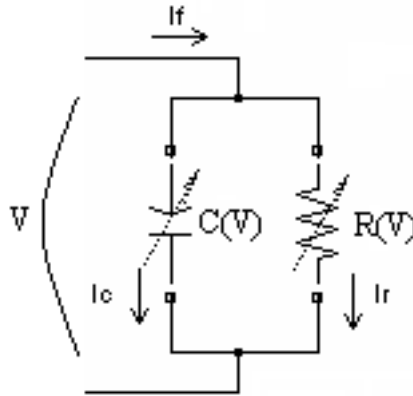


Figura 2.6: Circuito equivalente do ZnO

## 2.3 Características do Pára-raios de ZnO

### 2.3.1 Definições padrões de parâmetros importantes

- Tensão Nominal ( $V_n$ )

A tensão nominal de um pára-raios é o valor da tensão eficaz a frequência nominal (60 Hz no Brasil) para o qual o pára-raios é projetado, sendo utilizada como parâmetro na especificação das características de operação dos pára-raios[6].

- Corrente de fuga ( $I_f$ )

A corrente de fuga representa a corrente de frequência nominal que circula pelo pára-raios, quando o mesmo é submetido a uma tensão em regime permanente de frequência nominal, seja em operação normal no sistema ou em ensaios de tensão aplicada[6].

- Máxima Tensão Contínua de Operação ( $V_c$ )

Maior valor de tensão eficaz a frequência industrial para o qual o pára-raios é projetado, de modo a operar continuamente com esta tensão aplicada a seus terminais[3].

- Corrente com tensão contínua de operação

Corrente em valor de pico que flui pelo pára-raios quando uma  $V_c$  é aplicada[3].

- Corrente de descarga

Consiste na corrente que flui através do pára-raios na ocorrência de um impulso de tensão, sendo caracterizada pela forma de onda, amplitude e polaridade[6].

- Corrente nominal de descarga ( $I_n$ )

Valor de crista da corrente de descarga, com forma 8/20  $\mu s$ , que é utilizada para classificar o pára-raios[6].

- Impulso de corrente de manobra

Magnitude do pico da corrente de um impulso padrão para impulsos de manobra[3].

- Corrente de impulso elevada

Magnitude do pico da corrente de um impulso de 4/10  $\mu s$  que é usado para verificar a estabilidade de um pára-raios quando submetido a descargas diretas[3].

- Tensão residual ( $V_{res}$ )

Valor de pico do impulso de tensão observado entre os terminais do pára-raios durante a condução de um impulso de corrente pelo pára-raios[3].

### 2.3.2 Classificação de pára-raios de ZnO

- Classe de descarga de linha

Uma classificação numérica é dada aos pára-raios de corrente nominal de descarga entre 10 kA e 20 kA de acordo com a capacidade de absorção de energia[3].

- Classe do alívio de pressão

A capacidade do pára-raios de suportar uma corrente de falha interna sem destruir o invólucro determina a classe do alívio de pressão. Esta classe é aplicada para equipamentos com caixa de porcelana ou polímero[3].

### **2.3.3 Outras características importantes**

#### **Característica de nível de proteção**

- Nível de proteção para impulsos de manobra

Máxima tensão residual para um impulso específico de corrente de manobra.

- Nível de proteção para impulsos atmosféricos

Máxima tensão residual para a corrente nominal de descarga.

- Nível de proteção para um degrau de corrente

Tensão residual para uma corrente íngreme com tempo de frente entre 0,9 e 1  $\mu s$  e tempo de queda menor que 20  $\mu s$ .

#### **Característica de suportabilidade de tensão em freqüência nominal no tempo**

Indica a duração máxima de tempo que o pára-raios pode suportar cada nível de tensão em freqüência nominal sem causar danos ou instabilidade térmica[3].

#### **Características de suportabilidade de poluição**

O pára-raios deve suportar diferenças de temperatura e descargas parciais internas que podem ocorrer na coluna de blocos de ZnO devido a poluição na superfície externa do seu invólucro[3].

## **2.4 Desempenho térmico**

Dois fatores determinam o desempenho do equipamento pára-raios: propriedades elétricas e térmicas dos elementos e instalação e projeto do equipamento.



Apesar do pára-raios de ZnO sem centelhador estar mais próximo do pára-raios ideal do que o de SiC com centelhador, por não conter centelhador, uma corrente de fuga está sempre fluindo causando aquecimento nos blocos de ZnO. Esse fator pode ser perigoso para a sua estabilidade térmica, principalmente na região de baixas correntes, por ser a região mais comum de operação e onde a temperatura afeta diretamente a curva  $V-I$ .

### 2.4.1 Capacidade de dissipação de calor e estabilidade térmica

Geralmente os elementos de ZnO ficam em um ambiente com gás ou sólidos que limitam o resfriamento enquanto estiver conectado para proteger um equipamento em operação. A figura 2.7[3] mostra o efeito na corrente que a temperatura causa para os mesmos valores de tensão. Se o calor não for dissipado, danos ao equipamento podem ocorrer. Desta forma, a estabilidade térmica é um dos mais importantes critérios para a utilização dos pára-raios de ZnO.

A estabilidade térmica é afetada pela capacidade de dissipação de calor e da temperatura ambiente, assim como pelo nível de degradação e envelhecimento do equipamento. Para ter estabilidade térmica, a dissipação de potência nos blocos de ZnO deve ser balanceada com a saída de calor para o ambiente. A capacidade de dissipação térmica  $Q$  do pára-raios pode ser expressa pela equação:

$$Q = C_T \cdot (T - T_a) \quad (2.2)$$

onde  $T$  é a temperatura dos elementos de ZnO,  $T_a$  temperatura ambiente e  $C_T$  fator de dissipação térmica. A dissipação de potência (geração de calor)  $P$ , que depende da tensão e do material, pode ser aproximada por:

$$P = A \cdot e^{-(W_c/kT)} \quad (2.3)$$

onde  $W_c$  é energia de ativação,  $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$  eV/K (constante de Boltzmann),  $T$  a temperatura do elemento e  $A$  depende da tensão aplicada e dimensões físicas dos elementos.

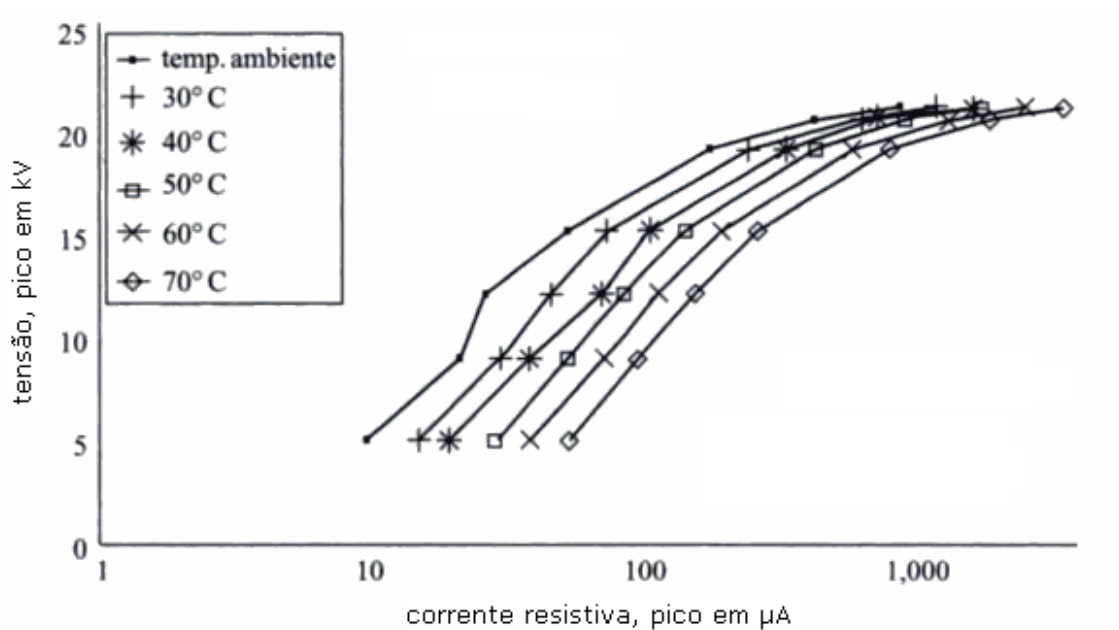


Figura 2.7: Efeito da temperatura na curva  $V$ - $I$  para baixas correntes

Exemplos de curvas dessas equações são mostrados na figura 2.8 [3]. Para uma temperatura ambiente  $T_a$  e tensão  $V_1$ , as curvas se encontrariam nos pontos  $X$  e  $Y$ . O ponto  $X$  está em uma temperatura estável  $T_x$  e é chamado de ponto de estabilidade inferior. O ponto  $Y$  também está em uma temperatura estável,  $T_y$ , e é chamado ponto de estabilidade superior. Ambos são pontos de estabilidade porque são pontos com a mesma quantidade de potência que entra e que sai.

Normalmente, a temperatura dos blocos fica no ponto de estabilidade inferior, para isso, a curva  $Q$  da temperatura inicial deve ter um ponto de estabilidade inferior com a curva  $P$  da tensão aplicada. Uma absorção de energia de uma sobretensão poderia levar a temperatura até o ponto  $Y$  mas depois voltaria ao ponto  $X$ . Caso a temperatura passe de  $T_y$ , a dissipação de potência do elemento irá crescer muito mais que a capacidade de dissipação de calor. Assim, caso a operação do pára-raios leve para um ponto além do ponto  $Y$ , não será possível dissipar todo o calor gerado e a consequência será o aumento da temperatura até a avalanche térmica. O pára-raios é projetado para operar no ponto  $T_x$  e a diferença de energia entre os pontos  $X$  e  $Y$  é chamada de surto permitido de energia.

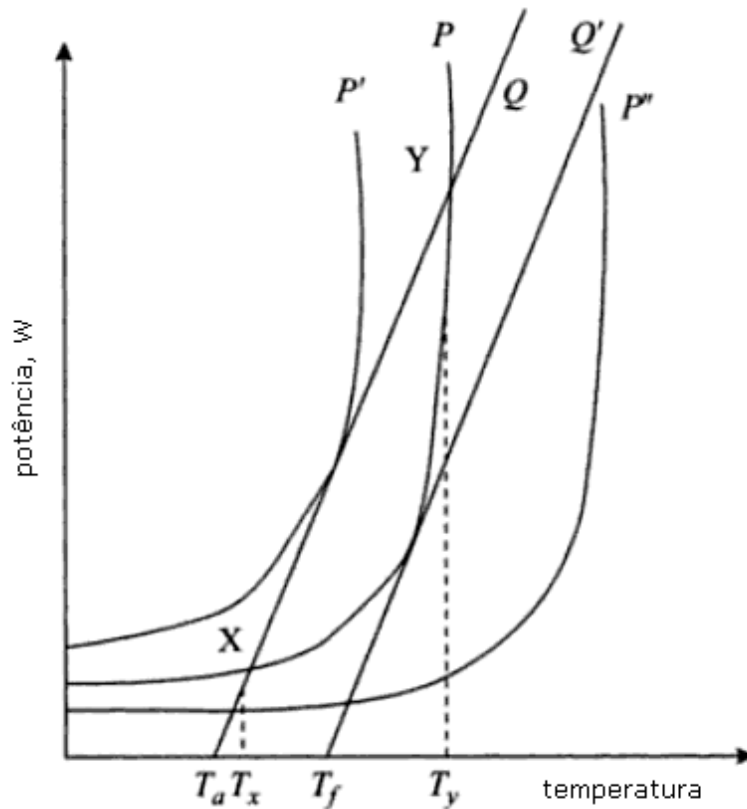


Figura 2.8: Gráfico da estabilidade térmica

onde:

$Q$  - perda de calor para uma temperatura ambiente  $T_a$

$Q'$  - perda de calor para uma temperatura ambiente  $T_f$

$P$  - potência dissipada para uma tensão  $V_1$

$P'$  - potência dissipada para uma tensão  $V_2$  ( $V_2 > V_1$ )

$P''$  - potência dissipada para uma tensão  $V_3$  ( $V_3 < V_1$ )

As curvas  $Q'$ ,  $P'$  e  $P''$  servem para mostrar outras possibilidades e como que um dimensionamento errado pode fazer com que as curvas não se encontrem, ou que tenham praticamente um único ponto de estabilidade, assim como também podem mostrar alterações das condições iniciais  $Q$  e  $P$  com o tempo de operação do equipamento.

Porém, o tempo necessário para voltar para  $T_x$  após um surto pode ser demorado, portanto, é importante entender que a figura 2.8 pode ser utilizada apenas para avaliar elevações térmicas partindo de regime permanente, quando já se passou tempo suficiente para estabilizar a temperatura.

## 2.4.2 Avalanche térmica

Como foi mostrado, a avalanche térmica ocorre quando a operação do pára-raios passa do ponto de estabilidade superior  $Y$ , culminando na falha do equipamento. A seguir são mostrados alguns fatores que podem mudar a posição dos pontos de estabilidade.

### Temperatura ambiente

Uma temperatura ambiente maior diminui a capacidade de dissipação de calor e assim reduz a capacidade máxima. Voltando para a curva  $P$  na figura 2.8 e alterando a temperatura inicial para  $T_f$ , chega-se a conclusão de que os pontos  $X$  e  $Y$  agora são um único ponto, deixando nenhuma margem para variação de temperatura.

### Envelhecimento e degradação do pára-raios

O envelhecimento pode aumentar ou diminuir a dissipação de potência causando uma queda ou um aumento na capacidade de dissipação respectivamente. Para o caso mais comum, com aumento da dissipação de potência, a expressão da geração de calor pode ser expressa por:

$$P = P_0 \cdot (1 + h\sqrt{t}) \quad (2.4)$$

onde  $P_0$  seria o valor de um equipamento ou bloco novo, que pode ser obtido pela equação (2.3),  $h$  é uma constante e  $t$  representa o tempo.

A degradação dos elementos aumenta a corrente de fuga, levando ao aumento na dissipação de potência. Esse efeito irá mudar a posição do ponto  $X$  para uma temperatura maior. Com o equipamento passando a operar com uma temperatura maior, mais degradação irá ocorrer. Esse processo eleva a curva  $P$ , diminuindo a margem de temperatura  $T_x - T_y$ , até que a curva  $P$  passe para a curva  $P'$ , igualando os pontos  $X$  e  $Y$ , e uma avalanche térmica deverá ocorrer algum tempo depois.

A corrente de fuga dos pára-raios de ZnO é, então, um parâmetro importante para ser correlacionado com o seu envelhecimento e com a possibilidade de falha por avalanche térmica.

## **Nível de tensão aplicada**

Devido a grande não-linearidade, um pequeno aumento no nível de tensão, pode causar um grande aumento na corrente e, portanto, da potência, causando o mesmo efeito observado na degradação.

## **Capacidade de dissipação de calor do invólucro**

A dissipação de calor de um bloco sozinho seria melhor comparado aos blocos dentro de um invólucro devido ao fluxo de calor que se forma na coluna de blocos. A dissipação de calor fica prejudicada no centro, fazendo com que a temperatura nas extremidades fique menor que no centro[3].

## **2.5 Degradação e envelhecimento**

Nível de degradação de um pára-raios indica o estado elétrico atual do equipamento em relação ao estado passado. Esse nível mostra a confiabilidade e pode ser usado para estimar o tempo de vida do equipamento.

Uma forte degradação elétrica resulta no aumento da corrente de fuga na região de baixas tensões.

### **2.5.1 Diferenças entre degradação e desempenho térmica**

Existem duas diferenças:

1. Os tempos entre os dois processos são diferentes, sendo a degradação mais lenta e com pouca dependência da temperatura. O aumento da corrente para a degradação normal é, geralmente, proporcional à raiz quadrada do tempo ( $\Delta i \propto \sqrt{\Delta t}$ ), enquanto que é exponencial com a raiz quadrada do tempo na avalanche térmica ( $\Delta i \propto e^{\sqrt{\Delta t}}$ ).
2. As mudanças causadas na curva  $V-I$  na degradação são mantidas mesmo após a remoção do causador da degradação, enquanto que no desempenho térmico, pode ocorrer uma recuperação após o resfriamento.

## **2.5.2 Fatores que afetam a taxa de degradação**

### **Composição e processo de fabricação**

A explicação física para a degradação e envelhecimento é uma migração elétrica de íons de oxigênio perpendiculares aos contornos dos grãos, diminuindo a barreira de potencial. A quantidade de aditivos e o processamento com calor utilizados na fabricação dos blocos de ZnO afeta o coeficiente de não-linearidade. Produtos com um coeficiente maior degradam mais, pois a corrente que flui pelo material será relativamente maior. Além disso, a característica de longo prazo da corrente de fuga depende da composição e do processo de fabricação dos blocos, mesmo se inicialmente a característica  $V-I$  são semelhantes.

### **Homogeneidade**

A condução em um material não homogêneo não fica uniforme, causando diferenças de dissipação de energia resultando em um aquecimento localizado. O aquecimento pode levar a uma alteração irreversível das propriedades do pára-raios por alterar o caminho da corrente em um local.

### **Temperatura ambiente**

Como a temperatura afeta fortemente a corrente na região de baixa condutividade, uma temperatura ambiente maior causa maiores correntes fluindo no equipamento, acelerando o processo de envelhecimento.

### **Tensão de operação do sistema**

Devido a grande não-linearidade, a taxa de degradação depende da magnitude e do tipo de tensão (alternada ou contínua) aplicada.

### **Projeto e arranjo dos pára-raios de ZnO**

As principais características que podem afetar a taxa de degradação são a capacidade de dissipação de calor e a distribuição da tensão na coluna de blocos.

## **Poluição**

Poluição pode causar descargas parciais e efeito corona. Esses fenômenos elétricos causam erosão da superfície e dano localizado no material utilizado para proteger os blocos de ZnO. Descargas parciais podem diminuir a quantidade de oxigênio no gás ao redor dos blocos e ao mesmo tempo formar gases corrosivos.

## **Ambiente**

Elementos de ZnO protegidos com SF<sub>6</sub> degeneram mais rápido que no ar, porém adicionando uma pequena quantidade de oxigênio diminui a taxa de degradação. Caso submerso em óleo de transformador, a temperatura relativamente alta vai acelerar a degradação. Umidade também aumenta a corrente de fuga em baixas temperaturas.

## **Absorção de surtos**

Degradações são mais severas em casos de maiores correntes do que em maiores energias. Assim, a degradação causada por surtos de manobra poderiam ser ignorados, mas em materiais com pontos localizados de corrente, um surto com mais energia causar até derretimento. No caso de surtos atmosféricos, o pico da corrente tem grande influência na degradação, diminuindo a quantidade de surtos suportáveis de acordo com o aumento desse valor, uma vez que poucos surtos com picos muito elevados, causam mais danos que vários surtos com grande energia, mas com um pico baixo de corrente.

### **2.5.3 Mecanismo de destruição**

Métodos ultra-sônicos, sensíveis o suficiente para detecção de pequenos defeitos como rachaduras e aberturas, já foram utilizados para verificar as condições físicas de elementos que sofreram muitos estresses.

Em casos de absorção de grandes energias, por excesso de tensão contínua ou alternada ou um surto muito longo ( $> 100\mu s$ ), foi visto que uma fratura pode ocorrer no elemento de ZnO. A causa provável foi que deve ter ocorrido uma concentração não uniforme da corrente, aumentando a temperatura localmente. Em temperaturas

maiores que 820°C o aditivo principal,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , derrete e então grãos de  $\text{ZnO}$  na localização de concentração de corrente podem derreter também.

Em casos de surtos rápidos com grandes correntes, foi observado formação de rachaduras. O calor gerado em pouco tempo não pode ser transferido rápido o suficiente para outras partes do elemento[3].

## 2.6 Estimativa do tempo de vida

### 2.6.1 Ensaio de envelhecimento acelerado

Por ter constantemente uma corrente fluindo em seus elementos enquanto tiver a tensão do sistema sendo aplicada, o pára-raios vai sendo degradado e o resultado desse envelhecimento é um período limitado de tempo em que o equipamento poderá realizar a sua função de proteção. Esse período é o tempo de vida do equipamento.

Para se fazer a estimativa do tempo de vida são realizados ensaios de envelhecimento acelerado. Estes ensaios geralmente são realizados por longos períodos (1500 horas aproximadamente) com um nível de tensão elevado constante (mas ainda no joelho da curva  $V-I$  na região de baixas correntes) a uma temperatura constante mas também mais elevada do que o valor esperado de uso (entre 70 e 150 °C). A corrente  $I$  ou a perda de potência  $P$  é monitorada no tempo  $t$  até que um certo valor seja atingido. Esse valor é usado para caracterizar o fim do tempo de vida do equipamento. Alguns dos valores usados para essa marca são:

- quando a perda de potência atinge um valor crítico de 1 W/cm;
- quando a corrente de fuga chega a um valor, por exemplo, de 100 mA ou;
- quando a perda de potência chega a um valor que seja o dobro da perda de potência inicial.

Através desses ensaios de longo prazo, foi observado que as curvas  $P-t$  e  $I-t$  podem passar por três estágios:

1. Período estável onde nenhuma mudança das características do equipamento são percebidas;



2. Período de degradação onde  $P$  e  $I$  crescem com o tempo; após este estágio uma avalanche térmica pode ocorrer;
3. Período com uma grande elevação repentina de  $P$  e  $I$ [3].

## 2.6.2 Teoria de Dakin-Arrhenius

A teoria desenvolvida por Dakin diz, com base de que o processo de envelhecimento do ZnO é uma reação química, que o tempo de vida pode ser descrito pela equação de Arrhenius:

$$\log \xi = \frac{A}{T} + B \quad (2.5)$$

onde  $\xi$  é o tempo de vida;  $A$  e  $B$  são constantes dependentes do material e estresse; e  $T$  é a temperatura absoluta.

Essa teoria vem sendo muito utilizada para prever o tempo de vida dos equipamentos e muitos estudos indicaram que medições de corrente e de dissipação de potência estão de acordo com a equação de Dakin-Arrhenius. Mas existe um fator que não é considerado, a quantidade de surtos absorvidos durante o tempo de serviço do pára-raios. Mesmo assim, foi demonstrado que a equação é válida, mas apenas para uma limitada variação de temperatura (115-175°C)[3].

## 2.7 Procedimentos de ensaios para caracterização do pára-raios de ZnO

A caracterização de pára-raios de ZnO é feita a partir de resultados de ensaios de variados tipos e amplitudes de correntes e tensão. Nestes ensaios, são realizadas medidas precisas de corrente e tensão e da curva característica  $V-I$ .

### 2.7.1 Regime pré-descarga

A região de baixas correntes da curva  $V-I$  é determinada com ensaios com tensão contínua ou alternada. O nível de tensão utilizado nesses testes é regulado para limitar a corrente em até 10 mA, pois uma corrente de 20 mA gera uma quantidade

de calor capaz de causar degradações irreversíveis no pára-raios. O circuito em laboratório para ensaios de pára-raios com tensões alternadas e contínuas possui geradores de potência e transdutores adequados, divisores de tensão e resistores shunts com precisão suficiente para a determinação da curva  $V-I$ . Para corrente alternada, os sinais de corrente mudam bastante ao redor do joelho de condução como é mostrado nas figuras (2.9 e 2.10 [3]). Para comparar as características dos ensaios com tensão contínua e alternada, apenas o valor da componente resistiva da corrente alternada é considerada nessa região da curva  $V-I$ [3].

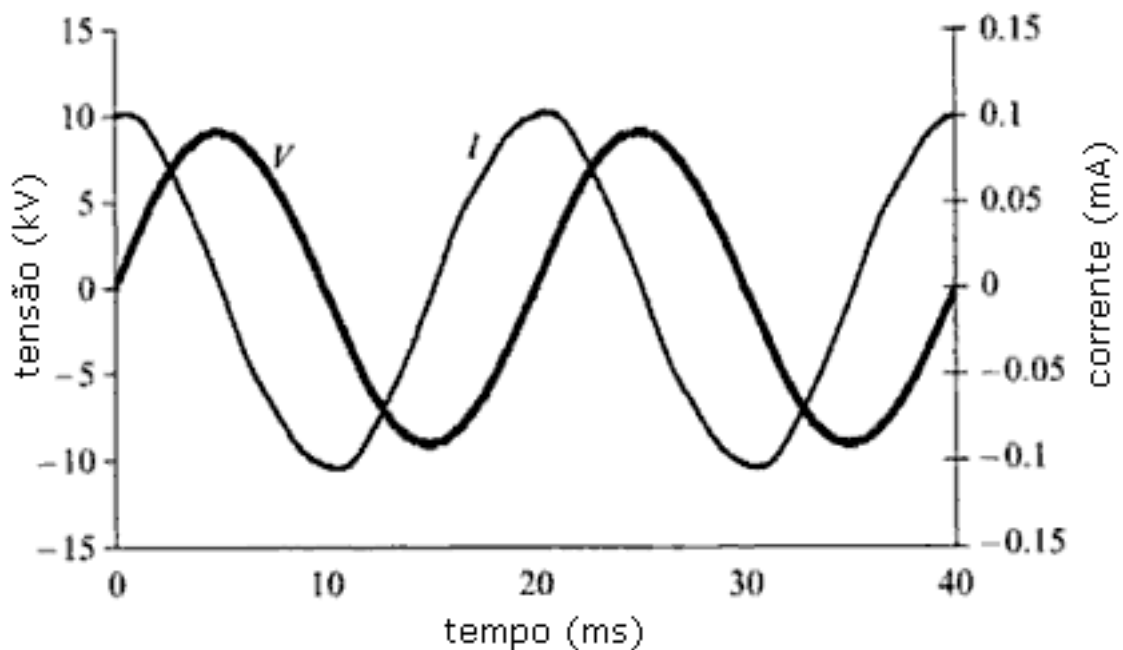


Figura 2.9: Exemplo de corrente para uma tensão no início do joelho da curva  $V-I$ .

### 2.7.2 Regime de descarga e região de altas correntes

Para construir o restante da curva  $V-I$ , impulsos de manobra de até 2,5 kA podem ser usados por estar dentro do especificado. Na região de altas correntes, impulsos atmosféricos ou rápidos de até 100 kA são aplicados, pois apesar da magnitude ser mais elevada a energia é menor devido ao tempo. A figura 2.11[3] mostra um arranjo laboratorial típico para ensaios de pára-raios de ZnO com impulsos. A medição dos sinais da tensão e corrente ( $v$  e  $i$  na figura) requer transformadores de corrente de resposta rápida e sem sobreoscilação. Um ensaio para o regime pre-descarga com

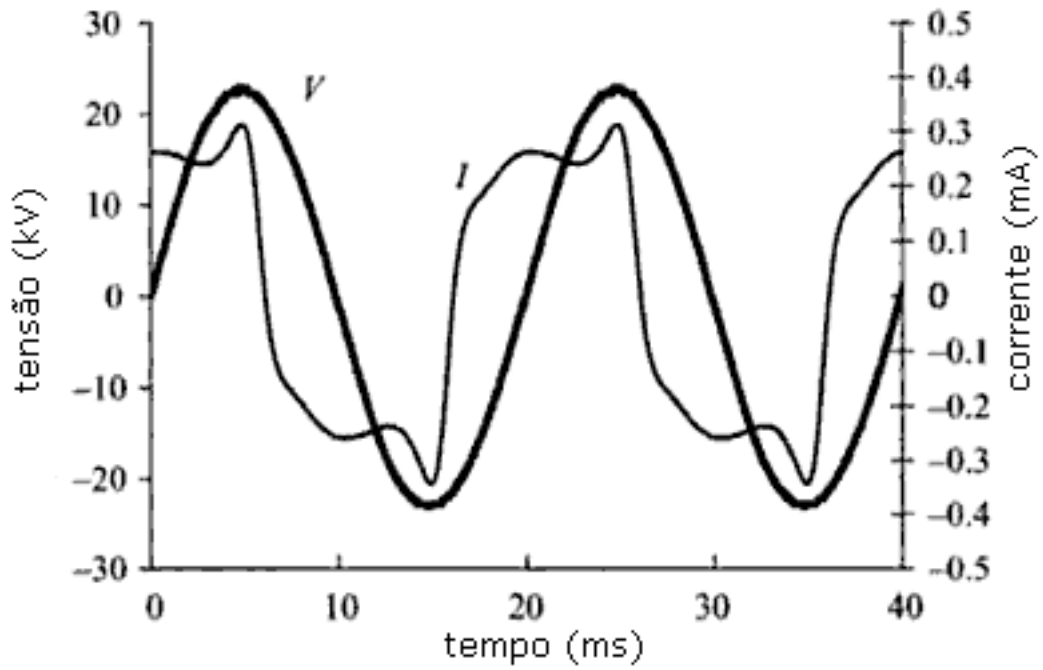


Figura 2.10: Exemplo de corrente característica para uma tensão no joelho da curva  $I$ - $V$ .

tensão alternada ou contínua possui um circuito parecido, alterando apenas a fonte e a ligação entre a fonte e os equipamentos.

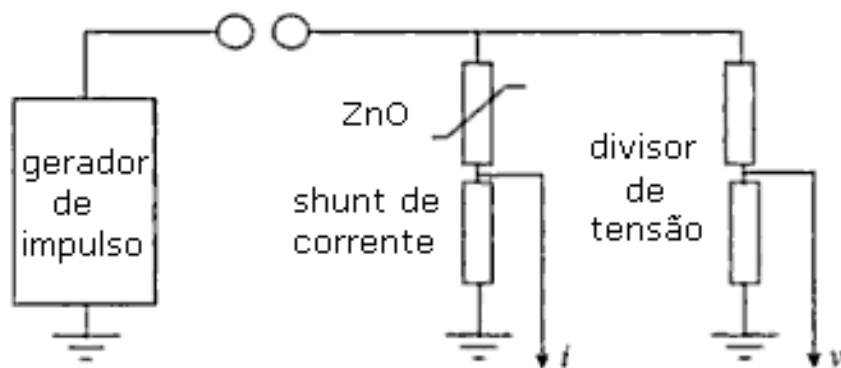


Figura 2.11: Esquema simples de um ensaio de pára-raios de ZnO com impulsos.

# Capítulo 3

## Monitoramento

Como foi apresentado no capítulo anterior, a proteção e a confiabilidade proporcionadas pelos pára-raios é importante. Mas, como todos os equipamentos, seu funcionamento correto tem limites. Durante seu período de serviço, o pára-raios absorve uma quantidade variável de surtos enquanto limita a tensão em níveis seguros para os equipamentos que protege; pode ficar exposto ao tempo e com diferentes temperaturas; e suportar pequenas alterações na tensão do sistema. Uma vez que a condução por ele é contínua, o desgaste de um pára-raios pode ser mais rápido ou lento dependendo da sua operação.

Existem muitos procedimentos para verificar o estado de operação do pára-raios. A seguir, são mostrados exemplos de procedimentos de monitoramento.

### 3.1 Medição da curva característica $V-I$

A medição da curva característica precisa ser realizada com diferentes valores de tensão e, portanto, é realizada em ensaios em laboratórios utilizando os procedimentos explicados em 2.7, com ensaios que dependem da região da curva a ser obtida. A figura 3.1[3] mostra uma curva  $V-I$  medida com esses procedimentos.

Apesar dos procedimentos para a construção da curva, a região mais importante para ser monitorada é a região de baixas correntes, com tensões de  $0,5 U_c$  até um valor de referência de tensão ou de corrente. Fazendo medições da curva  $V-I$  em diferentes momentos do pára-raios após períodos de serviço servem para comparar as mudanças causadas em cada período de serviço[7].

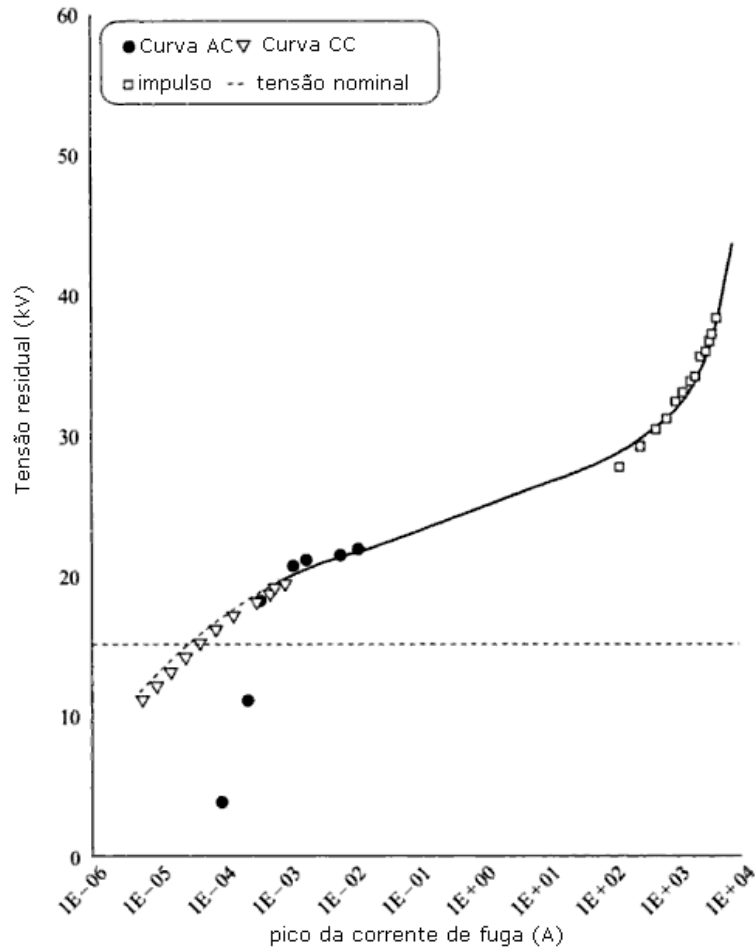


Figura 3.1: Exemplo de curva  $V-I$  construída com diferentes ensaios.

### 3.2 Medição da potência

A medição da potência ativa é feita com a corrente de fuga e a tensão aplicada obtendo um resultado que é proporcional à corrente resistiva. Por precisar da corrente e da tensão, é mais comum em laboratórios do que em campo, devido aos equipamentos necessários. O aumento da perda de potência com o tempo de uso é uma indicação de desgaste, pois esse aumento deve estar acompanhado de um aumento de temperatura, ver item 2.4. A medição de potência não depende do tipo da tensão, sendo uma forma possível para analisar pára-raios em sistemas de tensão contínua[7].

### **3.3 Medição de radiointerferência**

A medição de radiointerferência mede sinais de alta frequência gerados pelo pára-raios. Um medidor de radiointerferência mede os sinais que são captados por um transformador de corrente do tipo janela para altas frequências. Quanto maior a radiointerferência, maior a chance de desgaste. Medição mais utilizada com pára-raios de SiC, que possui uma radiointerferência maior devido a presença de centelhadores[8].

### **3.4 Medição de descargas parciais**

Como na medição de radiointerferência, a medição de descarga parciais mede sinais de alta frequência gerados pelo pára-raios. Quanto maior a quantidade de descargas parciais, maior a chance de desgaste dos elementos de ZnO.

### **3.5 Terceiro harmônico da corrente de fuga**

Aplicando-se uma tensão senoidal em um pára-raios, tem-se uma corrente de fuga contendo harmônicos, devido à característica não linear dos elementos de ZnO. Neste monitoramento, pode ser feita a medição apenas da corrente, facilitando seu uso tanto em ensaios em laboratório quanto no campo. O sinal da corrente então passa por uma análise, um programa computacional, para encontrar o terceiro harmônico que é um indicador do nível da corrente resistiva.

Um problema para esse método é que podem existir algumas degradações que não alteram o terceiro harmônico [7].

### **3.6 Termovisão**

Um método utilizado para monitoramento dos pára-raios em serviço, entre outros equipamentos, é a termovisão, que faz a medição da temperatura superficial do corpo do pára-raios, em termogramas (figura 3.2[8]), imagens que destacam valores máximos, mínimos e gradientes de temperatura.

Na termovisão é possível identificar a distribuição do calor pelo pára-raios, assim

como pontos onde a temperatura está mais elevada. Uma concentração de calor em um ponto do pára-raios indica um possível defeito [7, 8]. Como foi mostrado no item 2.4, o desempenho térmico do pára-raios é muito importante no seu funcionamento assim como na degradação.

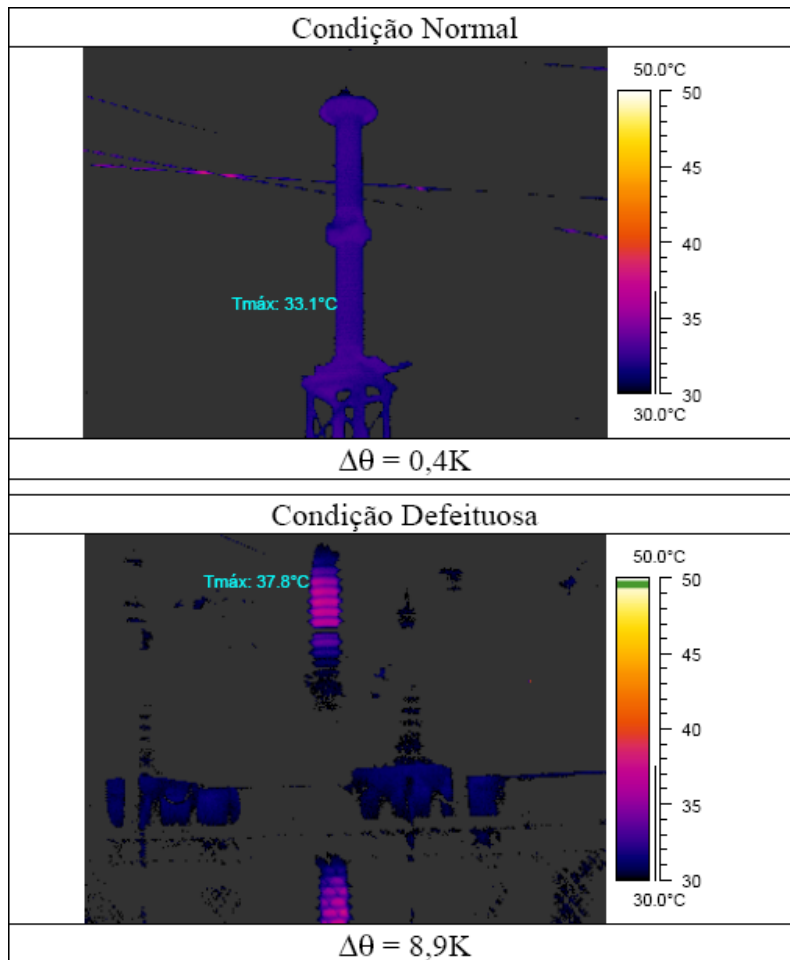


Figura 3.2: Exemplos de termogramas

### 3.7 Obtenção da componente resistiva da corrente

A componente resistiva é, geralmente, menos de 5% da corrente de fuga do pára-raios de ZnO, para a região pré-descarga. Considerando também a grande não-linearidade do ZnO, uma medição com baixa incerteza da componente resistiva não é fácil. Mas a importância da corrente resistiva como parâmetro para avaliação da condição de operação pode ser facilmente identificada em técnicas de monitoramento mostradas

nesse capítulo.

Na medição da curva característica  $V-I$ , a região mais importante para avaliação pode ser obtida com tensão contínua, pois é definida pela corrente resistiva. A medição da corrente de fuga e seu terceiro harmônico também está ligada à corrente resistiva, por ela ter uma quantidade significativa de terceiro harmônico e portanto uma variação do terceiro harmônico está fortemente ligado à uma variação da corrente resistiva. Na medição da potência e na termovisão, a perda de potência é proporcional à corrente resistiva, em fase com a tensão, e nesse processo é gerado calor.

Como foi mostrado em 2.2.2, o circuito equivalente para o ZnO utilizado é o  $R-C$  em paralelo, ambos sendo não-lineares. Dessa forma, para se obter a corrente resistiva, seria necessário remover a corrente capacitiva da corrente de fuga.

### 3.7.1 Circuito com capacitor de alta tensão

Uma forma comum de se obter a corrente resistiva é usando um circuito como o da figura 3.3[5] com tensões na região de baixas correntes da curva  $V-I$ . Um capacitor de alta tensão é colocado em paralelo com o pára-raios de ZnO de modo que a corrente que passa no ramo do capacitor tenha a mesma intensidade da componente capacitiva da corrente de fuga do pára-raios, para que ao se subtrair o sinal dessa corrente do sinal da corrente de fuga seja encontrado um sinal correspondente à corrente resistiva. Para se chegar à corrente capacitiva, é realizado um ajuste com os resistores de baixa tensão  $R$  e  $r$  de modo que a saída do amplificador diferencial esteja em fase com a tensão, que pode ser medida utilizando-se um divisor como em outros métodos mencionados anteriormente. Ou seja, o circuito é ajustado até que a corrente  $i_r$  do circuito passe por pelo zero nos mesmos momentos que a tensão.

Apesar do circuito mostrado apresentar resultados satisfatórios nas medições, alguns pontos devem ser considerados. Para se obter valores confiáveis na medição é necessário ajustar os parâmetros do circuito de compensação a cada aquisição. Este procedimento torna o circuito inadequado para medições durante um período de tempo relativamente longo ou sua automatização. Outros inconvenientes são:

- colocação da corrente resistiva em fase com a tensão de entrada através da análise visual: Adicionando um pequeno erro comum a qualquer medição



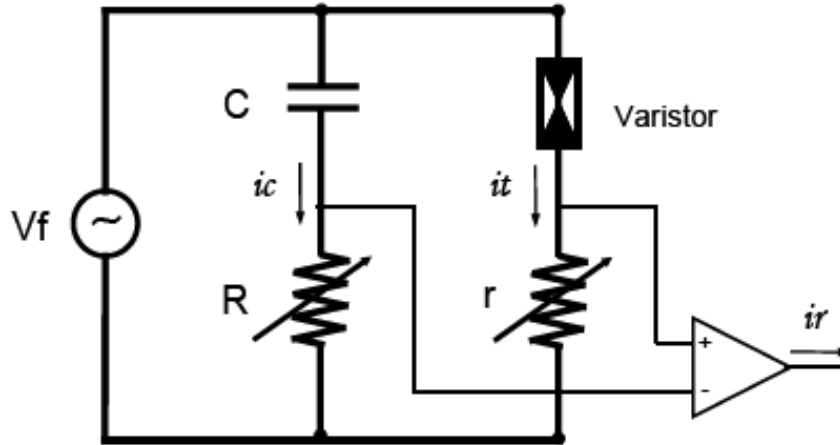


Figura 3.3: Circuito para medição da corrente resistiva.

visual;

- suposição de que a corrente resistiva que circula pelo ramo do capacitor de compensação  $C$  e do resistor  $R$  é nula: diminuindo o valor da corrente;
- considerar que a capacitância do pára-raios é linear[5]: quando nem mesmo no circuito equivalente mais simples (item 2.2.2) é feita essa aproximação.

Devido aos pontos mencionados, as correntes resistivas obtidas por esse ensaio têm como característica um sinal que não possui simetria, possui um comportamento de subida e outro de descida, tendo como certeza apenas a característica de passar aproximadamente pelo zero nos mesmos instantes em que a tensão. Seu máximo ocorre antes do máximo da tensão e após o máximo a corrente vai rapidamente para um valor próximo de zero como mostrado na figura 3.4. Outra característica observada comparando resultados é que quanto menor for a componente resistiva, maior será o tempo registrado entre o máximo da corrente e da tensão.

### 3.7.2 Ensaio com tensões próximas da $V_c$

Outra aproximação utilizada para a corrente resistiva é feita quando a tensão é alta o suficiente para que exista um pico na corrente de fuga (como os picos presentes nas figuras 2.10) que estão próximos ao pico da tensão. Nesses casos, a aproximação é considerar que esse pico é o pico da corrente resistiva, quando na verdade, como esse pico ocorre antes do máximo da tensão, aquele momento não é o mesmo do máximo de uma corrente em fase com a tensão.

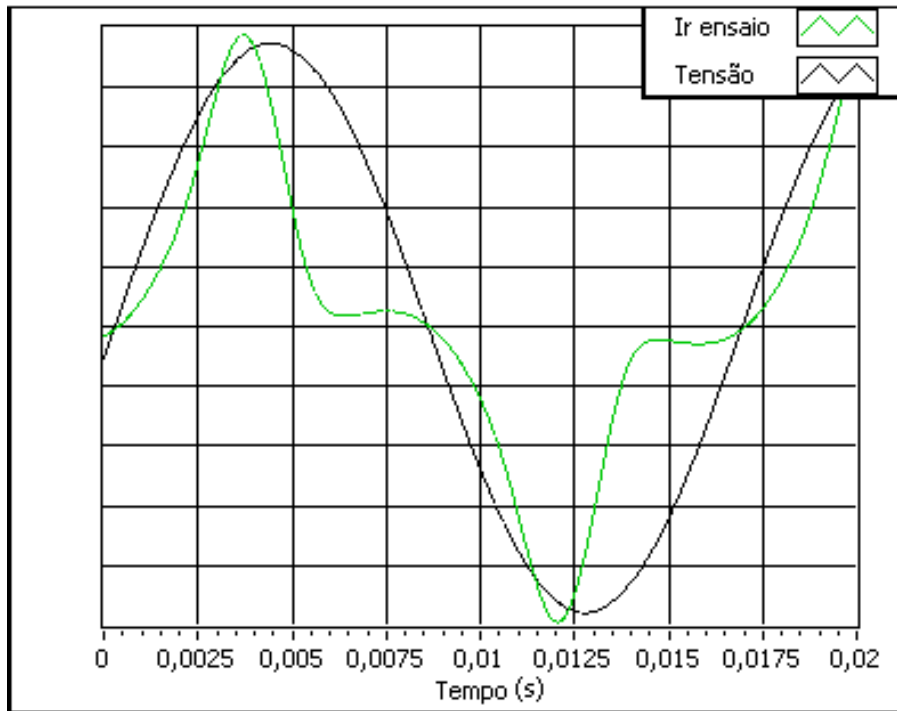


Figura 3.4: Exemplo de corrente resistiva obtida em ensaio com um circuito que removeria a corrente capacitiva. Escala vertical: Tensão 1,43 kV/div; Corrente 20,06  $\mu\text{A}/\text{div}$ .

### 3.7.3 Proposta do trabalho

É baseado nesse método para a obtenção da corrente resistiva que o programa computacional foi criado, mas como uma forma de eliminar a necessidade da utilização do braço capacitivo nos ensaios, do ajuste visual da resposta, da consideração de que a componente capacitiva possui uma relação linear com a tensão e a aproximação de que o pico da corrente de fuga próximo ao máximo de tensão seria o máximo da corrente resistiva, resultando em um sinal mais adequado.

# Capítulo 4

## DecomPR

O programa para a decomposição da corrente de fuga de pára-raios de ZnO, chamado de DecomPR, foi elaborado no LabVIEW, onde os programas recebem o nome de instrumentos virtuais (VI em inglês). LabVIEW é um ambiente de programação gráfica que é aplicada principalmente em automação e medições. Por ser uma linguagem que segue o modelo de fluxo de dados, com funções em blocos e linhas entre os blocos passando os dados, é uma programação que facilita a aquisição e processamento de dados e que ainda conta com ferramentas práticas para a criação da interface.

Os blocos podem conter funções simples como uma soma e mais complexas como a geração de um sinal com fase, amplitude, frequência, quantidade de pontos e diferença de tempo entre os pontos definidos. Além dos blocos com funções prontas, outros podem ser criados pelos programadores para estruturar melhor o programa, seja utilizando outros blocos dentro deles ou com blocos que permitem o uso de programação em texto, que podem economizar muitos blocos em poucas linhas.

A interface com o usuário é fácil de ser implementada utilizando os controladores e indicadores, entrada e saída de dados respectivamente, podendo ter botões, gráficos, indicadores numéricos e etc além de opções meramente visuais como um texto ou uma caixa.

As etapas da elaboração do instrumento virtual são mostradas a seguir.

## 4.1 Metodologia

O método aplicado na função para realizar a decomposição no programa foi baseado em um relatório do CEPEL [9] onde os coeficientes da série de Fourier dos sinais medidos são calculados permitindo a separação das componentes da corrente de fuga.

Para o cálculo dos coeficientes é necessário separar um período do sinal. Com os valores de um período, os coeficientes são calculados utilizando-se as seguintes equações:

$$a_n = \frac{1}{m} \cdot \sum_{k=1}^{2m} f_k \cdot \cos\left(nk \frac{360}{2m}\right) \quad (4.1)$$

$$b_n = \frac{1}{m} \cdot \sum_{k=1}^{2m} f_k \cdot \text{sen}\left(nk \frac{360}{2m}\right) \quad (4.2)$$

Onde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;  $m$  é o número de pontos correspondente à metade do período;  $f$  é um vetor com os pontos do sinal;  $k$  é o índice do vetor  $f$ , que tem  $2m$  valores, correspondentes a um período do sinal.

Após o cálculo dos coeficientes o sinal da corrente de fuga pode ser recomposto pela série de Fourier:

$$I_f(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\theta) + b_n \cdot \text{sen}(n\theta)) \quad (4.3)$$

Onde

$$\theta = \theta_t + \theta_i$$

com  $\theta_t$  sendo o ângulo variável no tempo e  $\theta_i$  o ângulo inicial.

De acordo com [10] a distorção total de harmônicos em uma fonte de tensão para ensaios em laboratórios não deve ultrapassar 5% do valor eficaz da componente fundamental. Considerando-se que a tensão em uma subestação também não apresenta harmônicos significativos, foi feita uma aproximação para considerar que o sinal da tensão é formado apenas pela componente fundamental, livre de harmônicos.

Como a corrente resistiva se mantém em fase com a tensão, se a tensão for um seno, a corrente resistiva será formada apenas pelos componentes seno ( $b$ ) da série

de Fourier encontrada para o sinal da corrente de fuga. Da mesma forma, a corrente capacitiva será descrita pelos coeficientes cosseno ( $a$ ).

Desta forma o sinal das componentes da corrente de fuga é facilmente obtido com a série de Fourier da corrente de fuga, pois assim como o cosseno está  $90^\circ$  adiantado ao seno, a corrente capacitiva está  $90^\circ$  adiantada em relação à tensão e, portanto, da corrente resistiva.

E então para

$$V(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cdot \text{sen}(n\theta) \quad (4.4)$$

tem-se:

$$I_r(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \text{sen}(n\theta) \quad (4.5)$$

$$I_c(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \text{cos}(n\theta) \quad (4.6)$$

Tendo as componentes, basta gerar os sinais formados pelos coeficientes em seno para ter a corrente resistiva.

Como foi dito no capítulo anterior, a parcela da corrente resistiva é pequena e a diferença entre os coeficientes  $a$  e  $b$  da série de Fourier pode ser grande, uma vez que os coeficientes da corrente resistiva podem ser bem menores que o maior coeficiente da componente capacitiva.

Assim, como uma forma de procurar evitar problemas de sensibilidade numérica, foi adicionado um outro processamento antes da decomposição. Tendo o ensaio com o braço capacitivo como base, foi usado um sinal senoidal ( $I'_c$ )  $90^\circ$  adiantado em relação à tensão para ser subtraído da corrente de fuga ( $I_f$ ), obtendo uma nova corrente ( $I'_f$ ) que será decomposta. A amplitude do sinal foi obtida da corrente de fuga no mesmo momento em que a tensão é aproximadamente zero, uma vez que nesse momento a componente da corrente também seria aproximadamente zero. Então esse sinal gerado não afeta a componente resistiva, mas causa uma grande redução na componente fundamental da corrente capacitiva, visando uma identificação mais clara dos coeficientes da componente resistiva.

A figura 4.1 mostra os passos realizados pelo programa: Realiza a aquisição dos sinais de tensão e corrente; encontra a amplitude de  $I'_c$  como o valor da corrente no momento em que  $V \approx 0$ ; encontra  $I'_f = I_f - I'_c$ ; separa um período da tensão entre  $t_i$  e  $t_f$ ; separa no sinal de  $I'_f$  o mesmo período entre  $t_i$  e  $t_f$ ; executa os cálculos da equação 4.2 para obter os coeficientes da série de Fourier da componente resistiva; utiliza os coeficientes calculados para montar a componente resistiva e; exibe o resultado. A corrente capacitiva pode ser encontrada fazendo a subtração da corrente de fuga original  $I_f$  pela corrente resistiva encontrada.

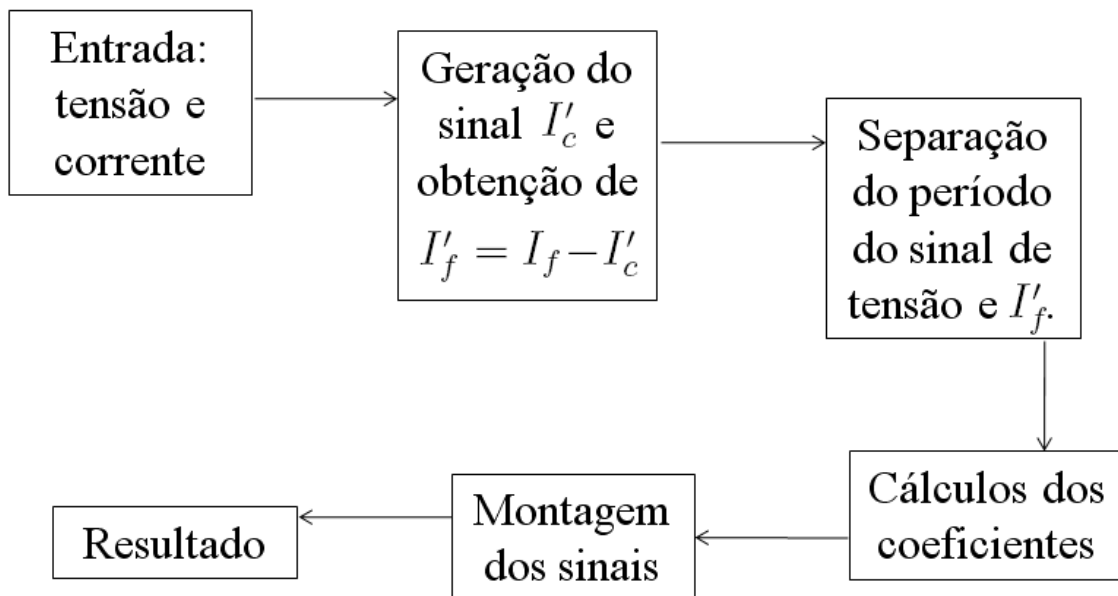


Figura 4.1: Etapas da função principal.

## 4.2 Validação do programa

A validação do programa foi realizada com dois tipos de dados: dados simples de uma simulação e dados de medições reais.

### 4.2.1 Dados de simulação

Utilizando o Simulink do Matlab, foi criado um circuito simples (figura 4.2) com uma fonte alternada alimentando uma resistência e um capacitor, em uma referência ao modelo mais simples de pára-raios. Os valores da fonte e dos componentes foram baseados em dados de em um ensaio, que posteriormente também serviram de

entrada no programa, como mais uma referência ao que ocorre na realidade, porém nesta simulação a resistência e o capacitor não eram variáveis com a tensão.

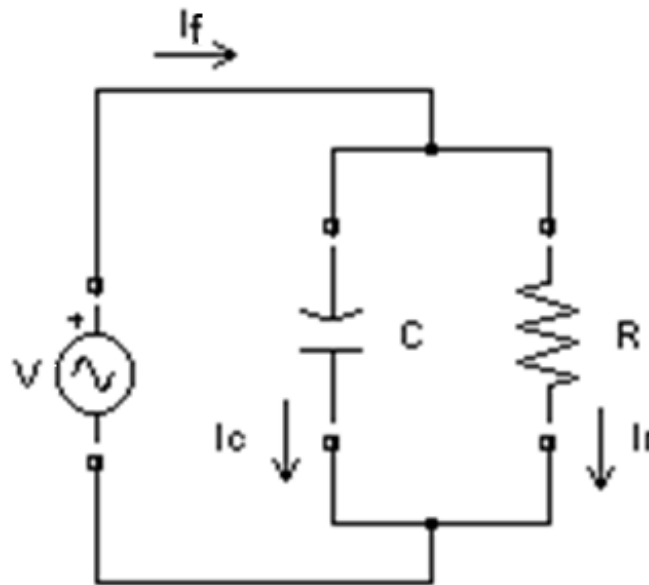


Figura 4.2: Circuito RC da simulação.

Nesta simulação foram quantificados digitalmente os sinais da tensão da fonte ( $V$ ), corrente de fuga ( $I_f$ ), corrente na resistência ( $I_r$ ) e corrente no capacitor ( $I_c$ ) para diferentes valores da resistência  $R$ , resultando em casos que, embora ainda fossem sinais com a mesma frequência e de componentes fundamentais, apresentassem diferentes porcentagens de corrente resistiva na corrente total, como se representassem diferentes níveis de degradação e para verificar se o método aplicado conseguiria separar as componentes mesmo que uma fosse muito menor que a outra.

Tendo esses dados, foram usados como entrada no programa o sinal da tensão e da corrente total para cada caso (figura 4.3). Como na simulação foi possível obter as correntes resistiva e capacitiva, a validação foi realizada comparando as correntes encontradas pelo programa com as correntes obtidas na simulação (figura 4.4) e para todas as variações da componente resistiva na corrente total, as componentes foram encontradas e calculadas sem problemas pelo método utilizado.

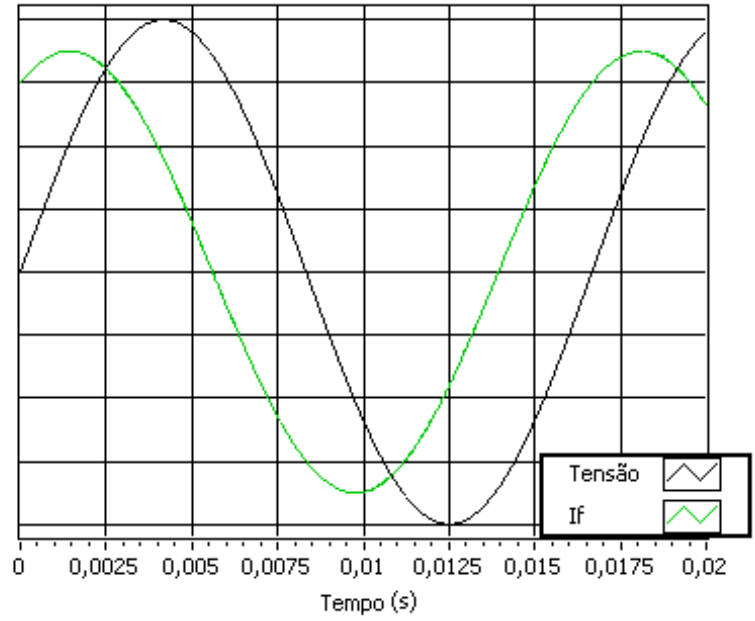


Figura 4.3: Sinais da simulação usados como entrada no programa. Escala vertical: Tensão - 50 kV/div; Corrente - 1,9  $\mu$ A/div.,

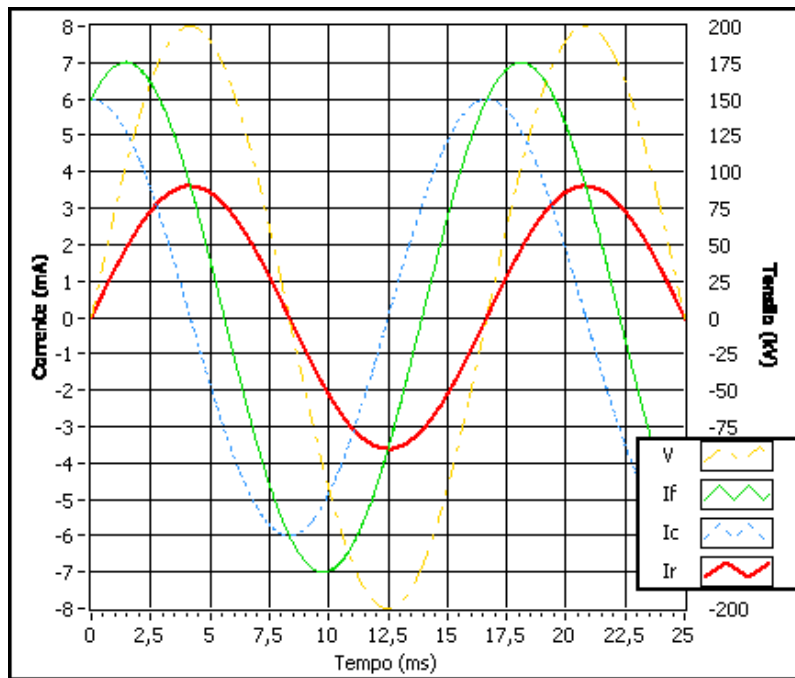


Figura 4.4: Resposta do programa para os sinais da simulação.



## 4.2.2 Dados reais

Os sinais utilizados foram de uma medição realizada anteriormente no laboratório do CEPEL, em ensaio de pára-raios de ZnO de 134kV com uma tensão aplicada de 200kV de amplitude, amplitude essa proposital para que ficasse aparente uma componente resistiva no sinal da corrente total. Os sinais, medidos com um osciloscópio, mostrados na figura 4.5, apresentam a mesma forma mostrada na figura 2.10.

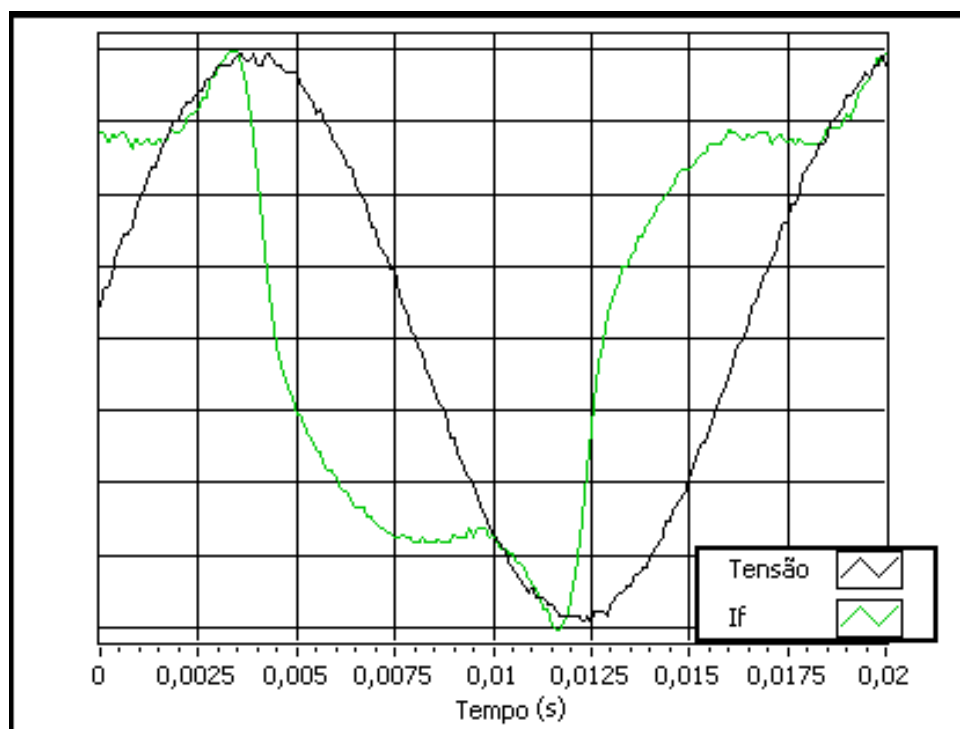


Figura 4.5: Sinais do ensaio de pára-raios usados como entrada. Escala vertical: Tensão - 50 kV/div; Corrente - 2  $\mu$ A/div.

Com a tensão e corrente dessa medição, o programa realizou a decomposição e encontrou uma resposta com o padrão esperado: uma corrente resistiva em fase com a tensão e com um crescimento não-linear em relação com a tensão; e uma corrente capacitiva adiantada em  $90^\circ$  da tensão com uma forma de senóide achatada em torno da crista, como mostra a figura 4.6. Observa-se que esses sinais medidos continham um ruído, mas a resposta do programa ainda apresentou uma forma esperada.

Após esta validação, o programa já realizou a decomposição de inúmeras medições, sempre obtendo a resposta esperada em casos em que a tensão respeitava a condição de aproximação de uma senóide com apenas componente fundamental

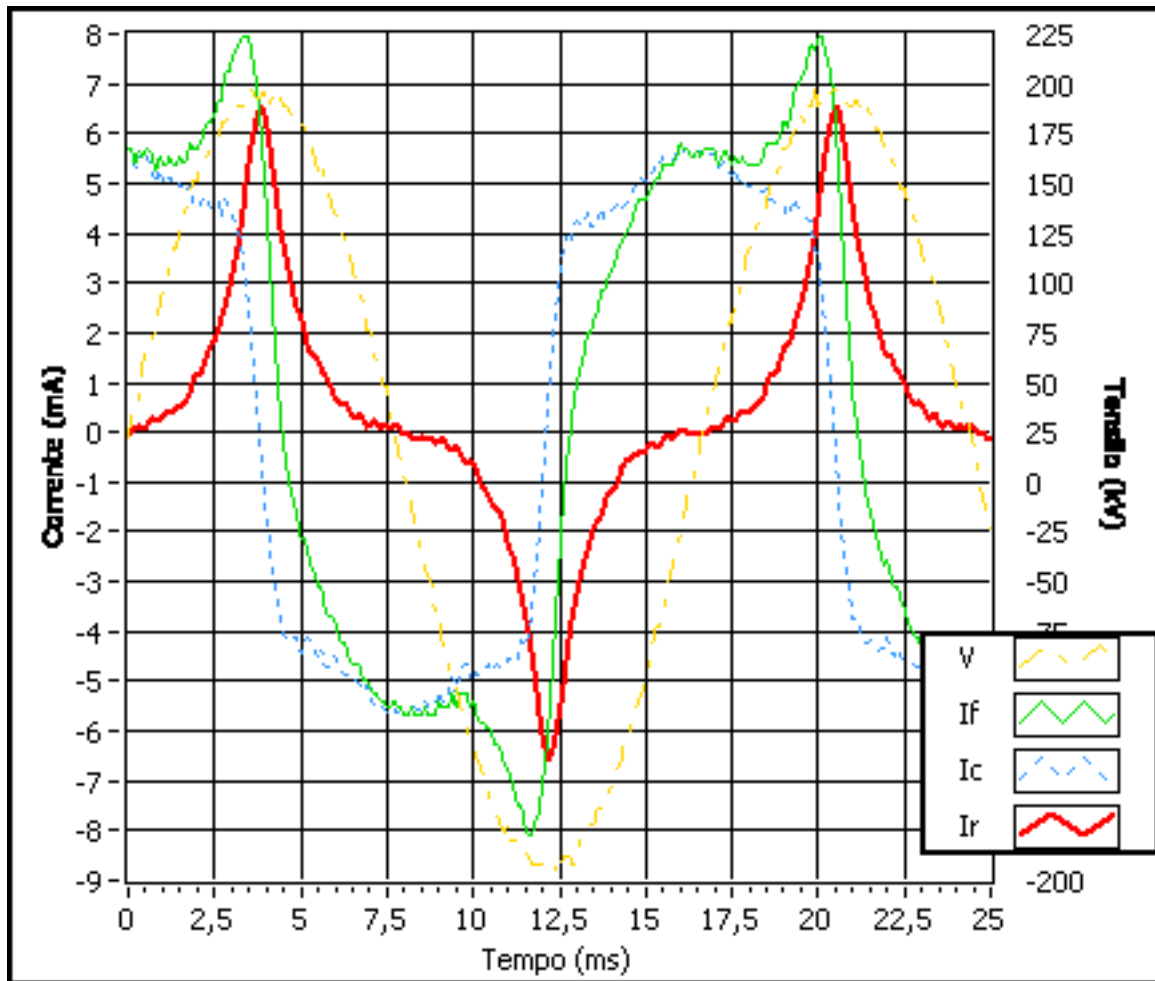


Figura 4.6: Resposta do programa para os sinais do ensaio de pára-raios.

ou que poderia ser representada apenas por componentes de mesma fase.

### 4.2.3 Outros resultados

Ainda utilizando dados de ensaios anteriores, o programa realizou outras decomposições de correntes de fuga. Aqui serão mostrados os resultados obtidos com sinais de um ensaio com um bloco de ZnO, contendo diferentes níveis de tensão e, conseqüentemente, de corrente de fuga e de relação entre  $I_r$  e  $I_c$ .

A tensão nominal deste bloco de ZnO é de  $4kV$  e as tensões aplicadas variaram entre  $3kV$  (figura 4.7) e  $4,2kV$  (figura 4.11), valor eficaz.

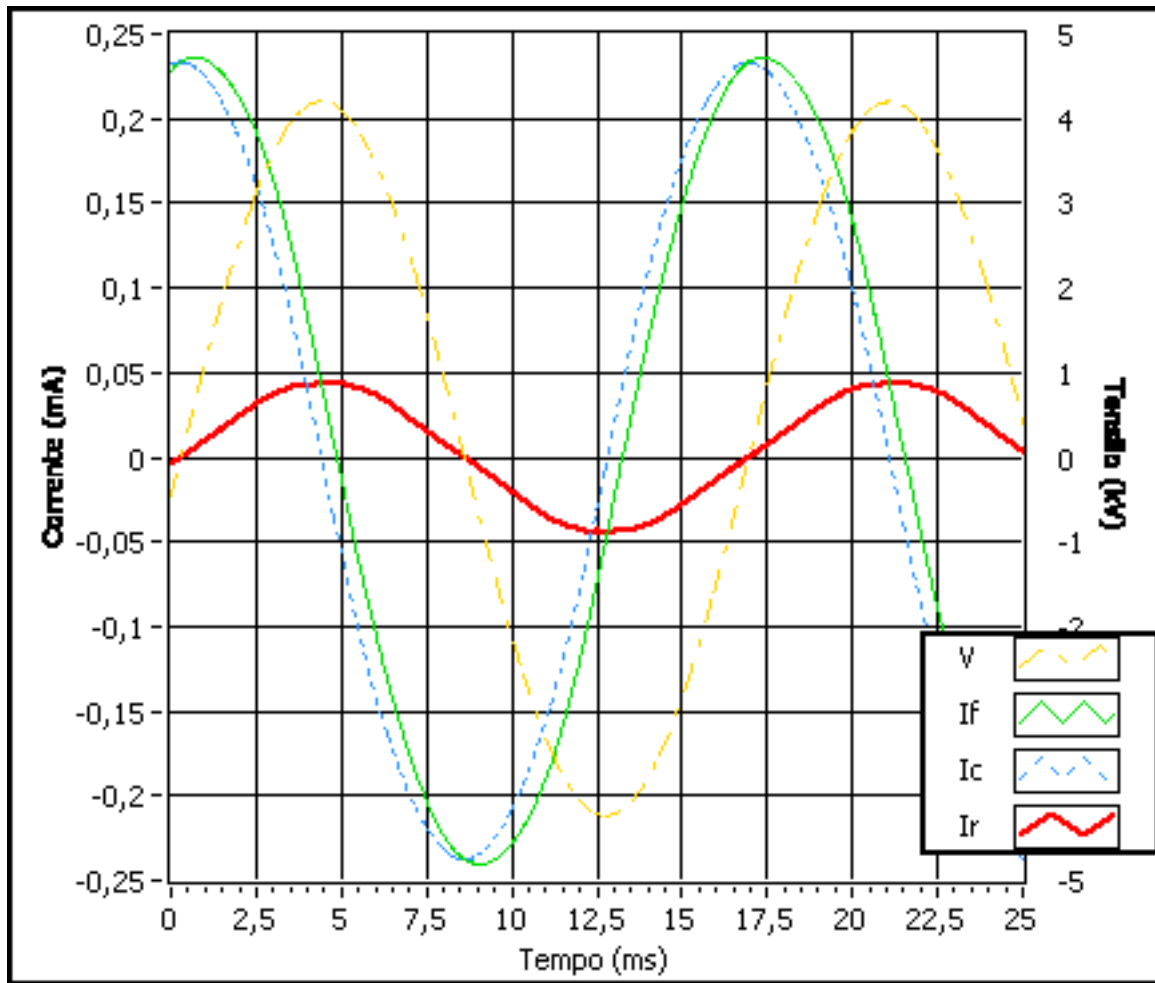


Figura 4.7: Correntes para uma tensão eficaz de 3kV. Com  $I_r = 0,185I_c$

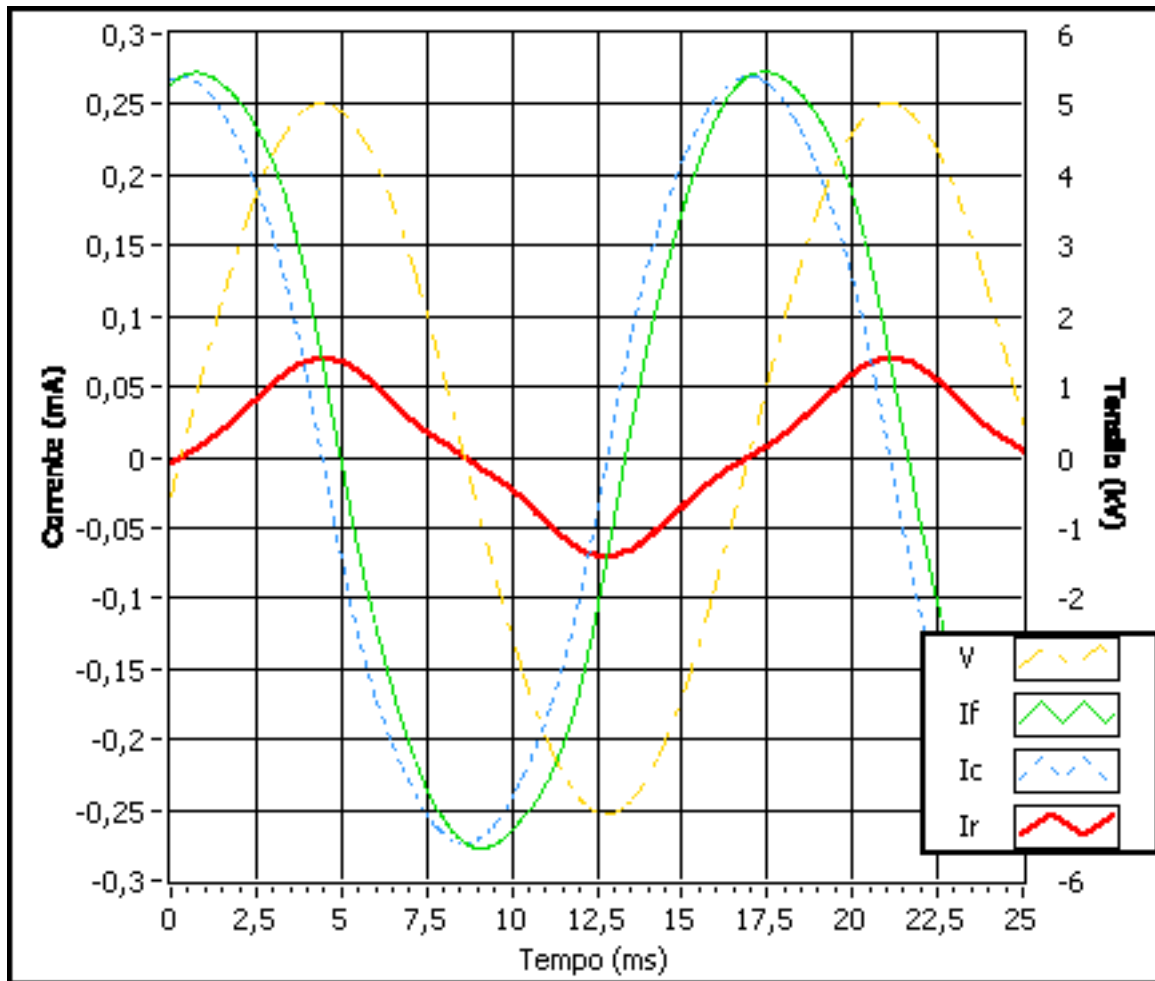


Figura 4.8: Correntes para uma tensão eficaz de 3,6kV. Com  $I_r = 0,255I_c$

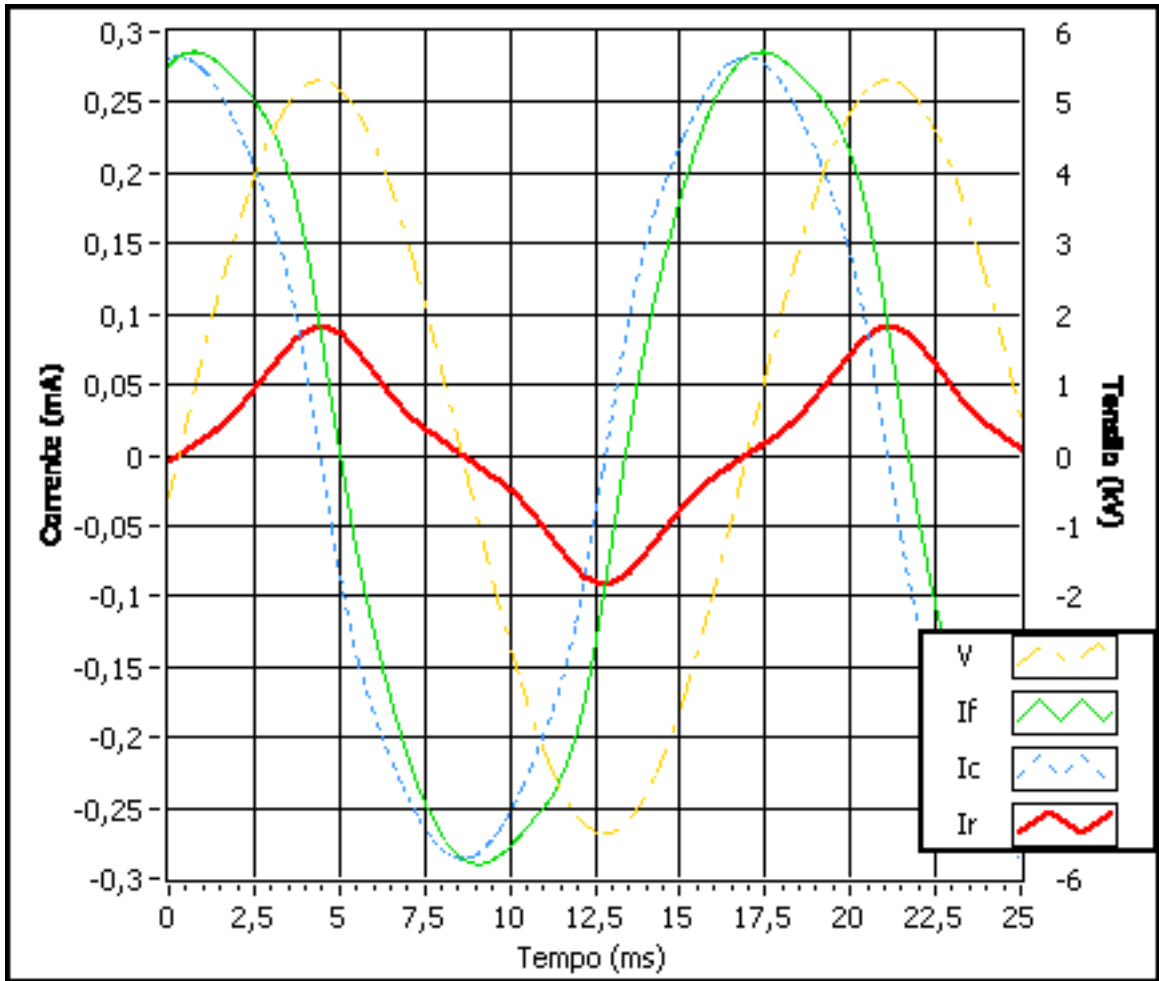


Figura 4.9: Correntes para uma tensão eficaz de 3,8kV. Com  $I_r = 0,317I_c$

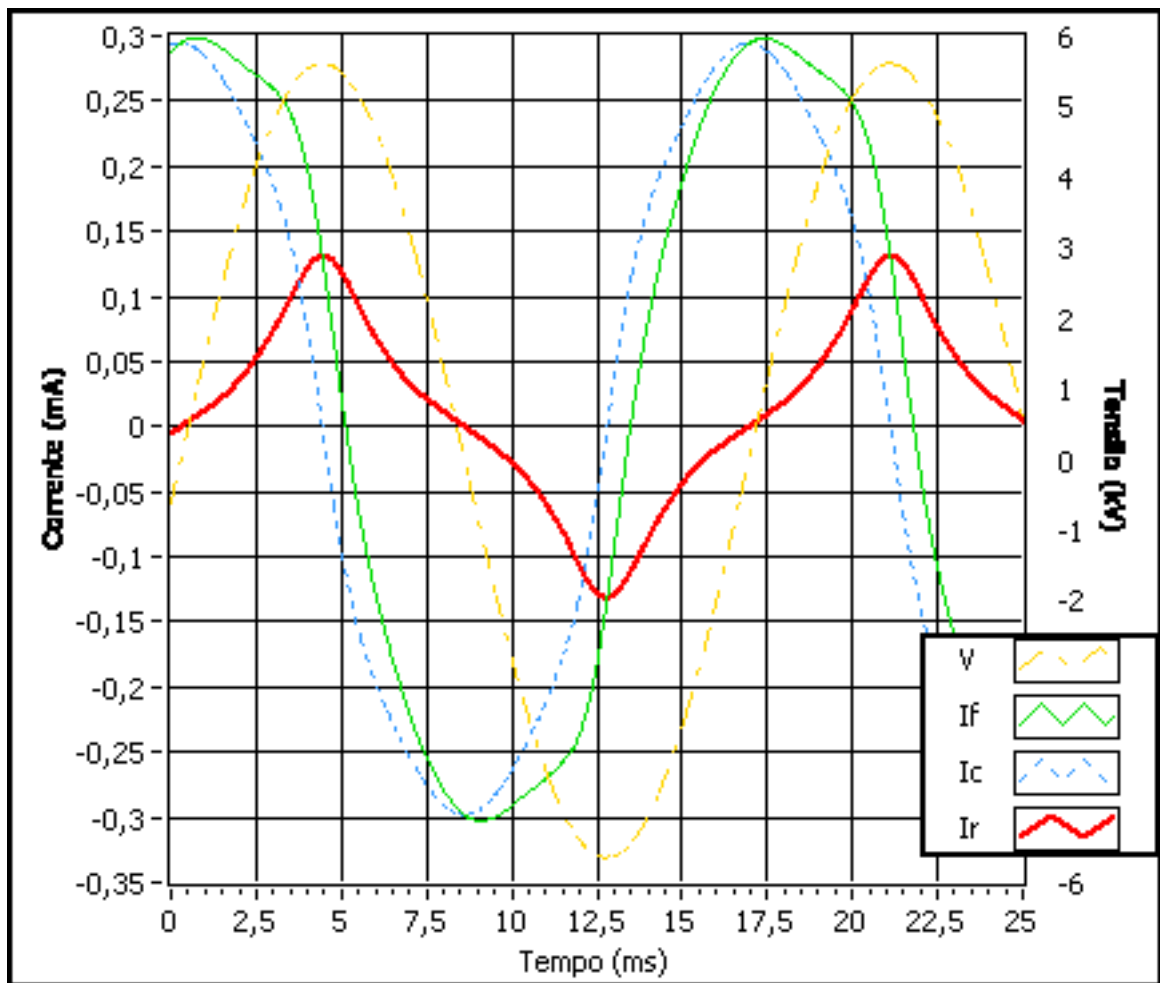


Figura 4.10: Correntes para uma tensão eficaz de 4kV. Com  $I_r = 0,439I_c$

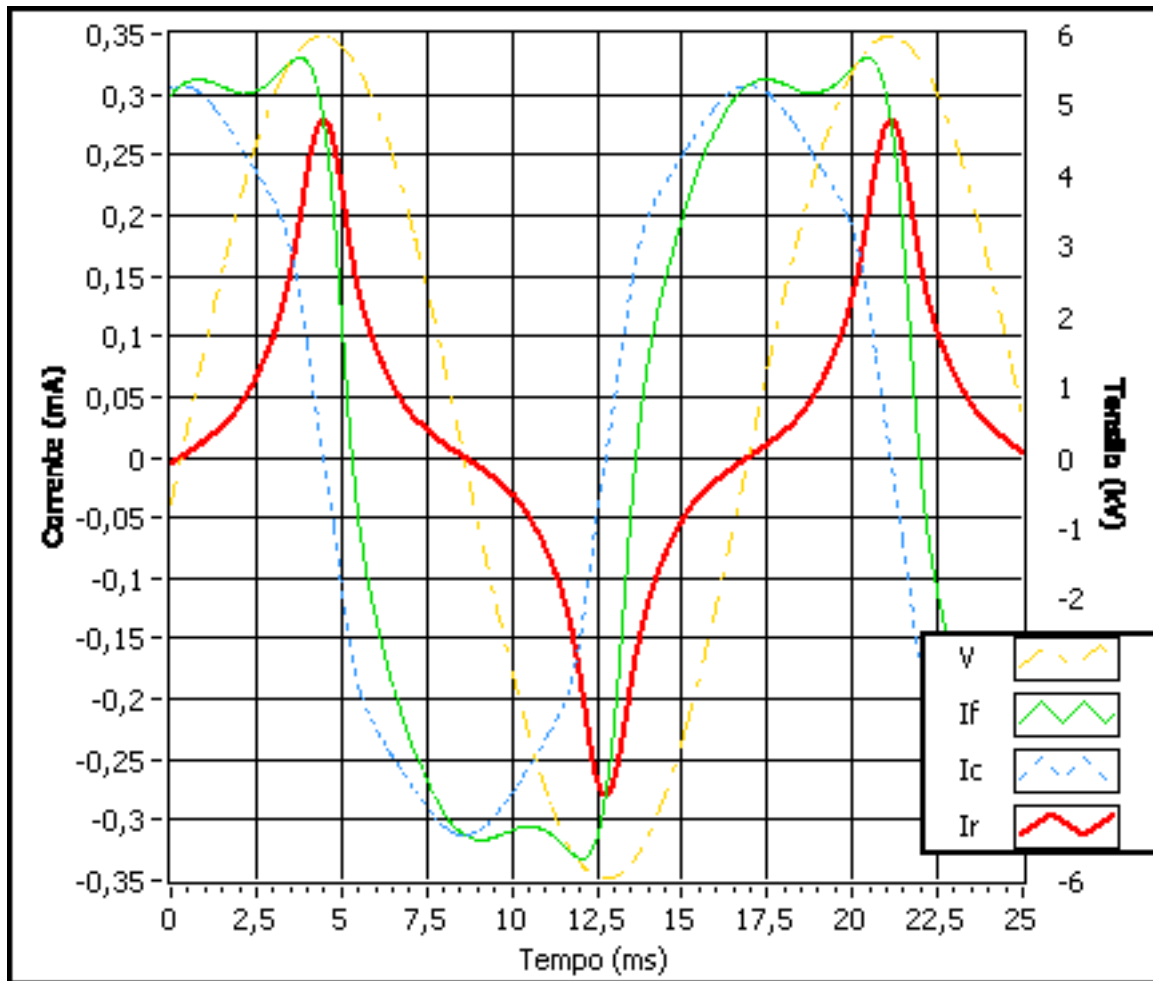


Figura 4.11: Correntes para uma tensão eficaz de 4,2kV. Com  $I_r = 0,890I_c$

Assim como no caso dos dados simulados, essa variação serviu para verificar a capacidade da decomposição de componentes com amplitudes diferentes. Neste caso, porém, não existe como fazer a medição diretamente das componentes, já que o objetivo do programa é justamente esse, obter as componentes, principalmente a resistiva.

Nesse ensaio com o bloco também foi utilizado um circuito capacitivo para eliminar a componente capacitiva da corrente de fuga como descrito em 3.7.1, e a comparação entre os resultados são mostrados a seguir.

### **4.3 Comparação do resultado do programa com método anterior**

Enquanto o método com o circuito capacitivo resulta em uma corrente resistiva sem simetria e considerava a corrente capacitiva como uma senóide, o programa realiza uma decomposição em série de Fourier para recriar a componente resistiva. A figura 4.12 mostra uma comparação dos resultados encontrados junto com a corrente de fuga, e observa-se que além da falta de simetria, o pico da corrente também seria afetado pela quantidade de corrente resistiva ainda existente no braço capacitivo. Observa-se na figura 4.13 que com uma corrente maior (aumentando a tensão aplicada), a diferença no tempo entre os máximos e a diferença da amplitude ficou proporcionalmente menor (de aproximadamente 19% para 11% em relação a corrente calculada), mas ainda há uma diferença de tempo entre os máximos da corrente resistiva. Observa-se também que o pico da corrente de fuga está em tempo e amplitudes bem diferentes para as duas correntes resistivas, indicando que a aproximação do pico da corrente de fuga como pico da corrente resistiva para todos os casos em que a componente resistiva é grande o suficiente para produzir esse pico não reflete a verdade.

### **4.4 Outras funções do programa**

A versão final do programa foi desenvolvida para ser usada durante os ensaios, obtendo os sinais da tensão e corrente e fazendo o processamento ao mesmo tempo, sendo possível usar o mesmo esquema de ensaio do circuito com o capacitor, só que sem a necessidade desse ramo capacitivo (figura 3.3). O que será medido nos ensaios é apenas a tensão aplicada no pára-raios e a corrente de fuga. Como o programa não foi testado em tempo real num ensaio, os resultados mostrados foram obtidos utilizando uma versão de teste do programa que aceita como entrada arquivos contendo sinais de tensão e de corrente, processados após os ensaios.

As outras funções presentes nesta versão são complementos básicos, mas necessários para o ensaio que o programa visa auxiliar. São funções de salvar e abrir as medições; apresentar de forma simples os sinais medidos, com opções para



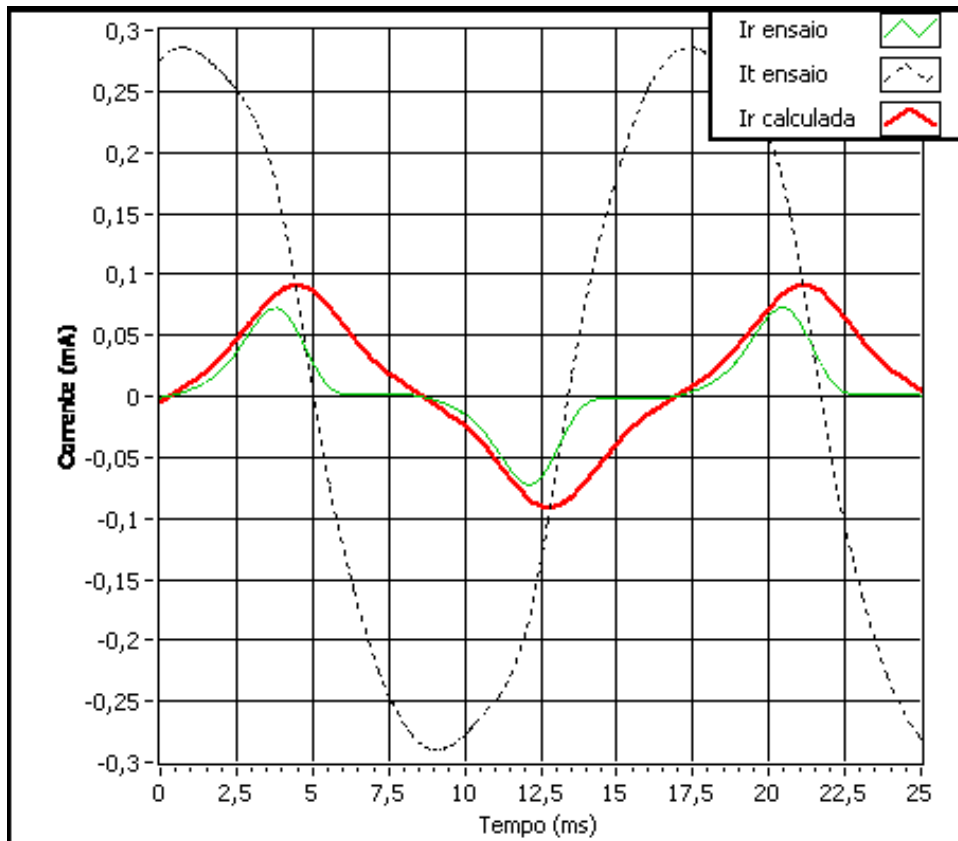


Figura 4.12: Correntes resistiva encontradas pelo circuito do ensaio e a calculada pelo programa, junto com a corrente de fuga.

alterar quais sinais serão mostrados; realizar um cálculo para a potência dissipada; indicar valores numéricos para os valores máximos dos sinais e; gerar um breve relatório que permite uma rápida avaliação de um conjunto de medições.

Das funções apresentadas no parágrafo anterior, a única que adiciona um cálculo ao programa é a indicação da potência dissipada. A potência é calculada a partir da seguinte equação:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) \cdot I_r(t) dt \quad (4.7)$$

onde  $V(t)$  e  $I_r(t)$  são a tensão aplicada e a corrente resistiva no tempo, o produto dos sinais é integrado no tempo de um período e então dividido pelo tempo do período.

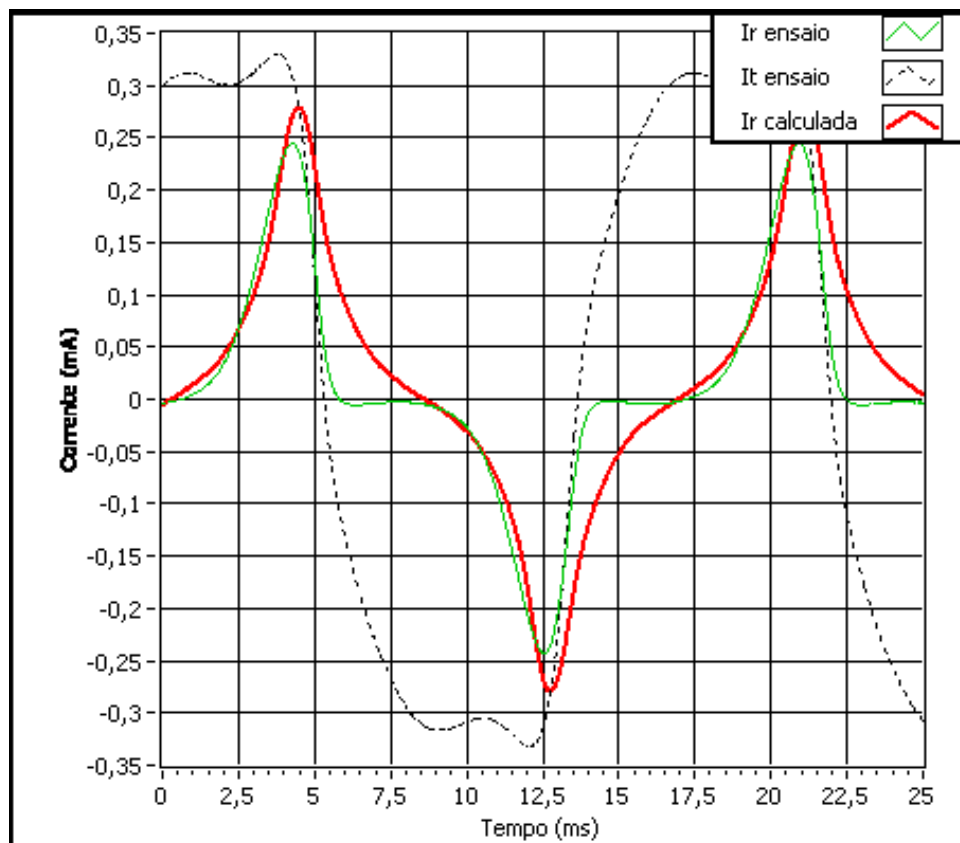


Figura 4.13: Correntes resistiva encontradas pelo circuito do ensaio e a calculada pelo programa, junto com a corrente de fuga para uma tensão maior.

# Capítulo 5

## Conclusão

Os pára-raios de ZnO têm se mostrado confiáveis para a função de proteção contra sobretensões nos sistemas elétricos de potência, mas há necessidade de se monitorar o seu estado operativo ao longo de sua vida útil. Essa necessidade visa garantir que o pára-raios esteja em condições de executar sua função de proteção por ocasião de ocorrência de sobretensões transitórias.

A metodologia desenvolvida, que pode ser aplicada no monitoramento da componente resistiva de pára-raios de ZnO, mostrou-se adequada para a separação da componente resistiva ( $I_r$ ) da corrente de fuga ( $I_f$ ) desses pára-raios na sua condição de operação contínua, quando  $I_r$  é apenas uma fração da componente capacitiva de  $I_f$ . Nessas condições essa separação não é tarefa fácil, tendo em vista também a não linearidade dos resistores de ZnO, que resulta em correntes com elevado conteúdo harmônico. A preocupação na identificação de componentes menores é caracterizada pelo condicionamento da corrente de fuga, que procurou eliminar uma grande parte da corrente capacitiva, mas que ainda depende da sensibilidade no momento da medição.

O programa computacional desenvolvido como ferramenta para implementação da metodologia mostrou-se adequado para ser utilizado em ensaios laboratoriais, realizados para avaliação de desempenho de pára-raios de ZnO quanto a corrente de fuga e suas componentes. Com ele, esses ensaios de pára-raios de ZnO poderão ser realizados com mais exatidão e mais simplicidade, além de possibilitar uma resposta em tempo real.

Os resultados obtidos com a utilização do programa se mostraram mais

consistentes em relação aos do ensaio que necessita um circuito adicional, requisitando ajustes a cada medição para obter uma aproximação das correntes capacitiva e resistiva. Essa consistência é observada pelo fato da corrente resistiva obtida pelo programa estar plenamente em fase com a tensão, não apenas nos momentos de zero, mas também com simetria e com o máximo junto com o máximo da tensão.

O valor máximo da corrente resistiva obtida pelo programa também foi diferente do encontrado pelo método anterior, utilizando-se o circuito com compensação. Esta diferença variou aproximadamente entre 10% e 20%. Esse fato, juntamente com o melhor ajuste da fase, demonstram a melhor exatidão dos resultados obtidos com o programa desenvolvido.

A simplicidade do ensaio também possibilita a utilização do método em pára-raios que estão em operação. A sua aplicação no campo para avaliação de pára-raios de ZnO em serviço requer um sensor de corrente, por exemplo um transformador de corrente com boa resposta para harmônicos, conectado no condutor de descida do pára-raios, no potencial terra, para medição da corrente de fuga total e o sinal da tensão correspondente à tensão aplicada ao pára-raios, que pode ser tomada do transformador de potencial mais próximo.

Mais informações sobre o funcionamento do programa segue em anexo no apêndice A.

# Referências Bibliográficas

- [1] PEREIRA, M. P., *Equipamentos Elétricos; especificação e aplicação em subestações de alta tensão*. cap. VIII, FURNAS, 1985.
- [2] MEISTER, A., *Modelagem de varistores de Óxido de Zinco para estudos de coordenação de isolamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2005.
- [3] HADDAD, A., WARNE, D. F., *Advances in High Voltage Engineering*. IET, 2004.
- [4] HINRICHSEN, V., “Overview of Recent Technological Developments for HV Line and Station Arresters & Future Tendencies”, *INMR*, Maio de 2007.
- [5] NETO, E. T. W., DA COSTA, E. G., DE SOUZA, R. T., et al., “Monitoração e Diagnósticos de Pára-Raios a ZnO”, *Revista IEEE America Latina*, Maio de 2006.
- [6] BARBOSA, F. B., *Técnicas de diagnóstico e correlação com fenômenos de degradação em varistores de ZnO*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFJR, 2007.
- [7] HEINRICH, C., HINRICHSEN, V., “Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks-Comparison of Existing and Newly Developed Procedures”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 1, pp. 138–143, Janeiro de 2001.
- [8] JUNIOR, J. T. B., DE CARVALHO, S. G., DE OLIVEIRA, M. J., et al., “Diagnóstico de campo da condição operativa de pára-raios de óxido de zinco em subestações de 138kV”, *CITENEL*, Novembro de 2001.

- [9] FILHO, O. B. O., *Determinação dos coeficientes da série de Fourier a partir de dados experimentais*. Relatório técnico do CEPEL, Abril de 1984.
- [10] IEC 60060-1 - Ed. 2, 1989: High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements.

# Apêndice A

## Manual

### DecomPR - Programa para decomposição da corrente de fuga de pára-raios de ZnO

#### A.1 Requisitos

O programa foi desenvolvido em LabVIEW. Deve ser utilizado em um PXI da National Instruments, podendo ser utilizado em um computador. Em ambos os casos é necessário além do LabVIEW ter o Microsoft Office Excel instalado, se quiser gerar relatórios.

#### A.2 DecomPR

A função deste programa (ou instrumento virtual) é realizar a decomposição da corrente de fuga de pára-raios de ZnO em ensaios laboratoriais tendo como entrada a tensão aplicada ao pára-raios (ou elemento de ZnO) e a corrente de fuga que passa pelo mesmo. Com esses sinais de entrada, o programa obtém em um gráfico a corrente resistiva e capacitiva contidas na corrente de fuga, enquanto seus valores máximos são indicados. Outra informação fornecida é a potência dissipada por ciclo.

Na interface do programa (figura A.1), podemos destacar 3 partes:

- 1 - Menu Principal
- 2 - Menu de visualização dos Sinais
- 3 - Medições e Resultados processados

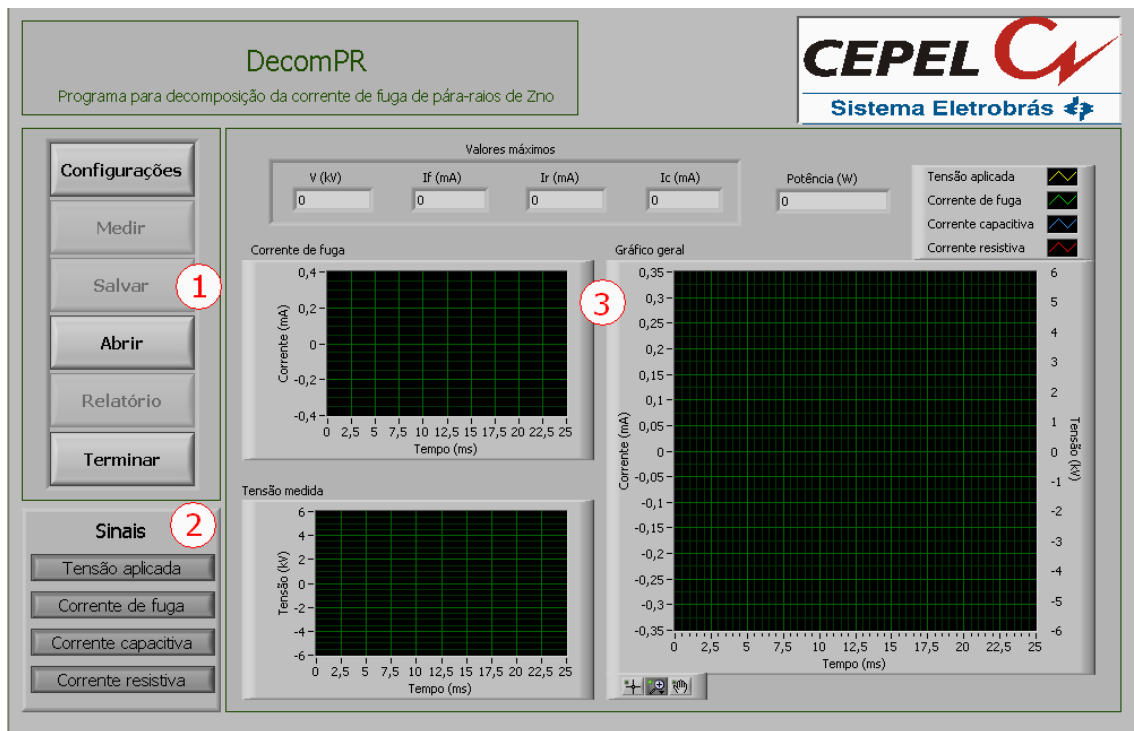


Figura A.1: Interface do programa com regiões numeradas.

### A.2.1 Menu Principal

O menu principal possui seis botões:



Figura A.2: Menu principal.

Cada um inicia uma função do programa:



## Configurações

Uma das funções disponíveis no início do programa e que precisa ser realizada para possibilitar a medição.

Clicando em Configurações, uma janela (Figura A.3) irá abrir com os seguintes campos para preencher:

The image shows a software configuration window with the following elements:

- Ensaio**: Text input field.
- Equipamento**: Text input field.
- Número**: Text input field.
- Participantes**: Large text area for participant identification.
- Fatores de transformação**:
  - Tensão**: Spinner control set to 1.
  - Corrente**: Spinner control set to 1.
- Configuração da Aquisição**:
  - Min Value**: Spinner control set to -10.
  - Max Value**: Spinner control set to 10.
  - Canais da Tensão e da Corrente**: Text field with example "Ex: PXI1Slot5/ai0:1" and a dropdown menu showing "I/O Dev1/ai0:15".
- Confirmar**: Red button at the bottom center.

Figura A.3: Janela de Configurações

- Nome do ensaio: Identificação do ensaio
- Equipamento/Amostra: Identificação do equipamento. Não usar "\" neste campo.
- Número: número de ensaios já realizados (Zero no início dos ensaios para cada amostra).
- Participantes: Identificação dos participantes do ensaio.
- Fatores de Transformação
- Tensão: Relação do transformador

- Corrente: Valor do shunt
- Configuração da aquisição:
  - Valores máximos e mínimos: recomendado utilizar os valores especificados para a placa utilizada para a leitura.
  - Canais da medição: colocar os dois canais utilizados, sendo o primeiro a entrada do valor da tensão, seguindo o exemplo. No exemplo, é mostrado que os canais de entrada 0 e 1 da placa no *slot* 5 do PXI estarão lendo os sinais da tensão e da corrente.

## **Medir/Parar**

Após fazer a configuração, o botão Medir irá ficar disponível.

Clicando em Medir, o programa irá fazer a medição e mostrará esta medida no gráfico da tensão e da corrente; realizará os cálculos e mostrará no gráfico geral todas as respostas; e no lugar do botão Medir irá aparecer o botão Parar e todo o resto do menu principal ficará desativado.

Para facilitar a visualização, é possível escolher quais sinais vão aparecer no gráfico ativando ou desativando os botões do menu inferior.

Clicando no botão Parar, a medição é interrompida, os últimos valores medidos e processados são mantidos e o menu principal volta a ficar disponível.

## **Salvar**

Após realizar a primeira medição, o botão Salvar irá ficar disponível.

Clicando em Salvar irá salvar em um arquivo tipo dat os valores medidos e itens da configuração que poderão ser utilizados no programa posteriormente.

O nome do arquivo é gerado automaticamente com a identificação do equipamento informado nas configurações seguido de um '-' e o número do ensaio.

## **Abrir**

Clicando em Abrir, será necessário fornecer um arquivo tipo dat salvo anteriormente pelo programa. Essa função irá processar novamente os valores medidos e fornecerá

a resposta, e irá preencher alguns itens da configuração que são utilizados para o relatório.

## **Relatório**

Este botão fica disponível após uma medição ser salva ou aberta, para ter um controle de que os dados da medição também foram salvos para possibilitar consultas em outros momentos.

O relatório será gerado em um arquivo do Excel e terá as informações do nome do ensaio, da amostra, dos participantes, das relações dos transformadores e shunts usados e uma tabela com os arquivos onde as medidas foram salvas e os valores máximos dos sinais calculados.

## **Terminar**

Clique neste botão para fechar o programa. Indisponível apenas durante as medições.

### **A.2.2 Menu de visualização dos Sinais**

O gráfico geral apresenta 4 sinais, esse menu serve para ativar ou desativar a visualização de cada um desses sinais.

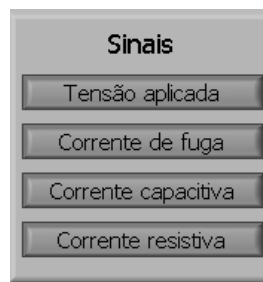


Figura A.4: Menu de visualização dos Sinais.

Cada botão possui o nome do sinal que é controlado, a posição padrão é com o botão pressionado, que indica que o sinal será mostrado. Essa alteração na visualização pode ser feita durante e depois da medição.

## A.2.3 Medições e Resultados processados

Dividido em 3 gráficos e um conjunto de mostradores numéricos.

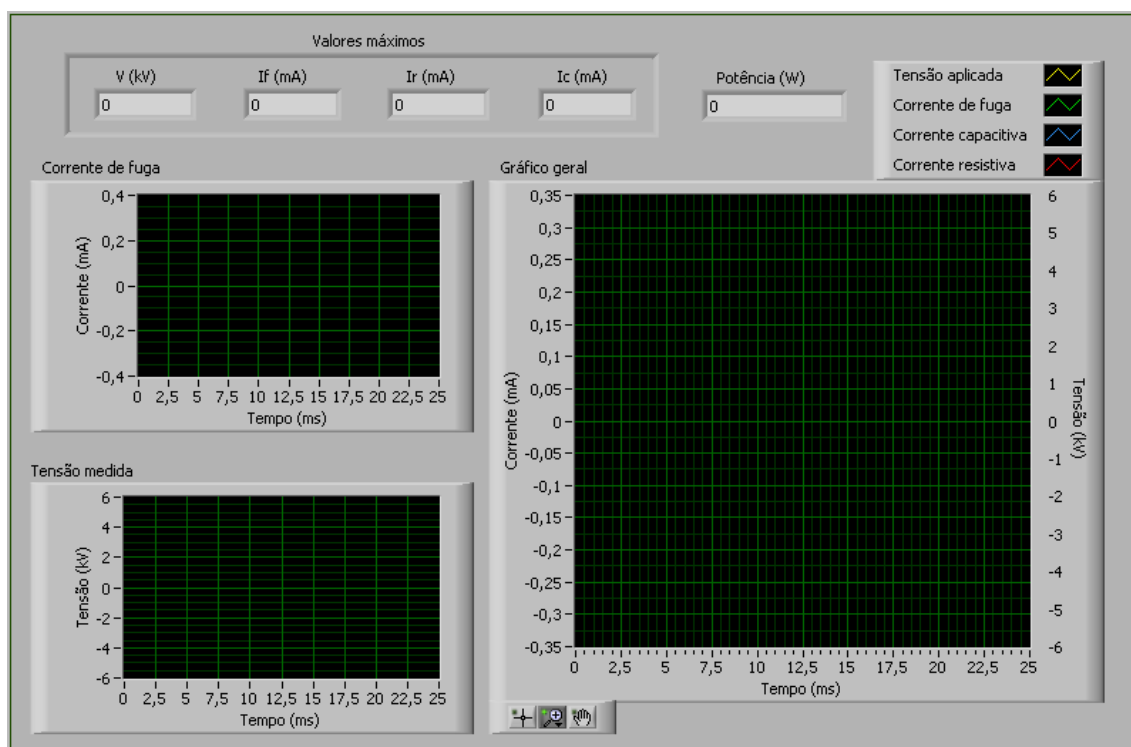


Figura A.5: Gráficos e mostradores.

### Gráficos

Os dois gráficos menores mostram os dois sinais medidos, a tensão e a corrente. O gráfico à direita é o gráfico geral, nele além dos sinais medidos são mostrados os sinais das correntes resistiva, capacitiva e total calculadas. Como mostrado sobre o Menu de visualização dos Sinais, é possível escolher quais sinais estarão ativos no gráfico.

### Mostradores

Nos mostradores temos os valores máximos dos sinais que podem ser vistos no gráfico geral e a potência dissipada em um ciclo.

## A.2.4 Outras informações

### Imagens

Para salvar em imagens os gráficos, o LabVIEW permite a exportação para uma imagem com fundo branco, mais indicada para impressões. Para obter essas imagens, clique com o botão direito do mouse em cima do gráfico, abrindo o menu da figura A.6.

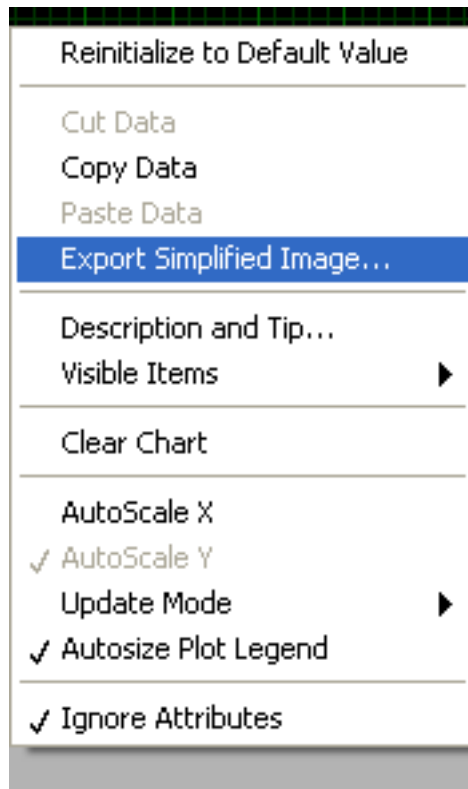


Figura A.6: Menu de opções para um gráfico.

Escolhendo a opção marcada, *Export Simplified Image*, será aberta a janela da figura A.7. Nesta janela existem opções para exportação em 3 formatos diferentes (bpm, eps e emf) podendo ser em um arquivo ou apenas para área de transferência (*clipboard*), permitindo que a imagem seja colada em outros aplicativos. Existe também a opção de esconder o grid.

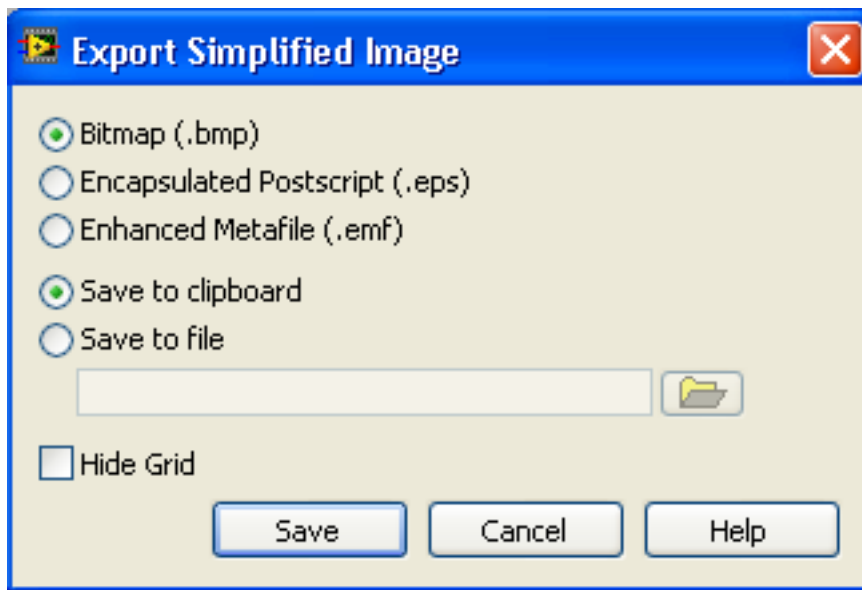


Figura A.7: Opções de exportação dos gráficos como imagens.

### **Retomando o ensaio de um equipamento após o encerramento do programa**

Se o objetivo for apenas continuar o ensaio, basta abrir a última medição, recuperando as informações, confirmar as informações indo em "configurações" e continuar os ensaios.

Caso queira passar para o relatório, será necessário abrir todas as medições anteriores, abrindo a medição mais recente por último para poder retornar ao número correto.

Mesmo no caso em que as medições estejam sendo abertas apenas para gerar um relatório, o último ensaio deverá ser aberto por último para o programa não perder a numeração.