

# MEDIÇÃO DE CORRENTE DE FUGA TOTAL EM PARA-RAIOS DE ZNO NO LEAT-UFPA E AQUISIÇÃO DA COMPONENTE RESISTIVA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE FILTRAGEM DIGITAL

Mellina M. Lisboa\*, William M. de Assis\*, João Henrique do R. Ribeiro\*, Alander Rocha Ribeiro\*, Pedro Henrique de M. Barbosa\*\*, Marcus Vinicius A. Nunes\*\*\*

\*Laboratório de Alta e Extra-Alta Tensão, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, (e-mail:mellinalisboa@gmail.com, willassis60@gmail.com, joaohenriquerosario@gmail.com, alanderribeiro1995@gmail.com)

\*\*Laboratório de Prototipagem, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará (pedrombarbosa.eng@gmail.com)

\*\*\* Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil (mvan@ufpa.br)

**Abstract:** Given the importance of using surge arresters as protection devices in the Electric Power System, as well as the need of periodical inspections in order to diagnose likely failures and increase the equipment lifetime, the resistive component of leakage current is used to evaluate the gadget operating conditions. The present study shows the total leakage current measurement test is shown using the series-resonant source from the High and Extra High Voltage Laboratory of UFPA and the results of the acquisition of such component by using the Digital Filtering Method, proposed by Lira (2007), in a computational routine developed in the Python programming language.

**Resumo:** Dada a importância da utilização do para-raios como equipamento de proteção no Sistema Elétrico de Potência e a necessidade de inspeções periódicas com o intuito de diagnosticar possíveis falhas e aumentar o tempo de vida útil desse equipamento, utiliza-se a componente resistiva da corrente de fuga como parâmetro de avaliação das condições de operação do mesmo. No presente trabalho, são mostrados o ensaio de medição de corrente de fuga total usando a fonte série-ressonante do Laboratório de Alta e Extra-Alta Tensão da UFPA e os resultados da aquisição dessa componente ao utilizar o Método de Filtragem Digital, proposto por Lira (2007), em uma rotina computacional desenvolvida em Python.

**Keywords:** Resistive Leakage Current; Total Leakage Current; Leakage Current Decomposition; Digital filtering; Surge Arrester.

**Palavras-chaves:** Corrente de Fuga Resistiva; Corrente de Fuga Total; Decomposição de Corrente de Fuga; Filtragem Digital; Para-raios.

## 1. INTRODUÇÃO

Os para-raios de Óxido de Zinco são um dos equipamentos de proteção mais utilizados no Sistema Elétrico de Potência, protegendo-o de possíveis ocorrências de sobretensões. Eles atuam como limitadores de tensão, retendo a passagem de determinados valores preestabelecidos desta, as quais podem atingir os equipamentos a serem protegidos, como transformadores, reatores, banco de capacitores etc. (ÁLVARES, 2008).

Tendo em vista que o para-raios está sujeito às mais diversas situações, seja pelas intempéries ambientais, como umidade e poluição do ar, ou os estresses resultantes das operações por ele efetuadas, torna-se imprescindível a inspeção no mesmo. Tal medida busca evitar falhas inesperadas, e assim, prolongar o limite de vida útil, além de garantir a sua substituição em casos mais urgentes. Diante disso, uma das formas mais comuns e diretas de diagnosticar falhas no mesmo é por meio da medição e da análise da corrente de fuga a partir dos métodos presentes na literatura como os de LIRA e COSTA (2013) e Doorsamy e Bokoro (2018).

Tal grandeza é formada por duas componentes: capacitiva e resistiva, e pode ser mensurada quando o para-raios sofre a aplicação de um valor de tensão correspondente a 80% do valor da sua tensão nominal na região de baixa corrente. A componente resistiva é de mais comum a análise, pois a mesma sofre influência dos níveis de tensão e da temperatura no para-raios, além de ser responsável pelas perdas de energia nesse equipamento.

Logo, este artigo busca apresentar uma metodologia de medição de corrente de fuga total em para-raios de ZnO, no Laboratório de Alta e Extra-Alta Tensão da UFPA (LEAT), a fim de contribuir, como um guia de testes, para a realização de ensaios em para-raios de outras classes no referido laboratório. Além disso, mostrar a aquisição da componente resistiva dessa corrente através de uma rotina computacional, em linguagem de programação Python, utilizando o Método de Filtragem Digital (LIRA, 2007).

## 2. CORRENTE DE FUGA

Em condições normais de operação, uma corrente flui pelos terminais do para-raios, na ordem de mA (mili Ampère) ou  $\mu$ A (micro Ampère), denominada corrente de fuga. Esta é

composta por duas componentes: capacitiva e resistiva. A primeira é muito superior em relação à segunda, por isso, ela é majoritariamente capacitiva (URSINE, 2013).

A componente capacitiva está relacionada às capacitâncias parasitas e à permissividade dos grãos de ZnO; apresentando uma forma de onda predominantemente senoidal e 90° de defasagem em relação ao sinal de tensão aplicado aos terminais do para-raios. Enquanto que a componente resistiva se mantém em fase com a tensão aplicada e possui forma de onda distorcida devido às características não-lineares da resistência variável (como é vista na Fig. 1), a qual varia com o aumento da tensão. Segundo a IEC 60099-5 (1999), a componente resistiva varia de 5% a 20% do valor de pico da corrente de fuga total.

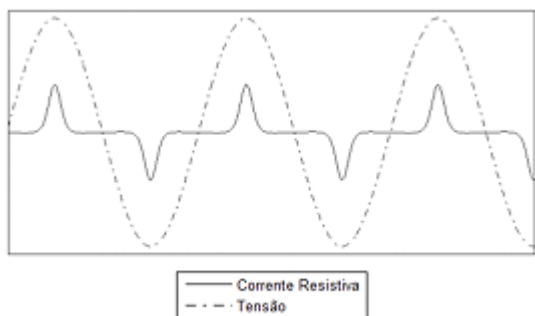


Fig. 1 Componente resistiva da corrente de fuga em fase com a tensão aplicada.

Fonte: URSINE, 2013

A componente resistiva possui caráter dissipativo. Desse modo, ela é responsável pelo aumento da temperatura no para-raios por efeito Joule; e passível à variação da frequência e da temperatura dos componentes dos varistores. A Fig. 2 mostra o momento em que a corrente resistiva é suficientemente alta a ponto de distorcer a forma de onda da corrente de fuga total. A elevação do valor da referida componente torna o para-raios sujeito a uma avalanche térmica, contribuindo para uma possível degradação do mesmo.

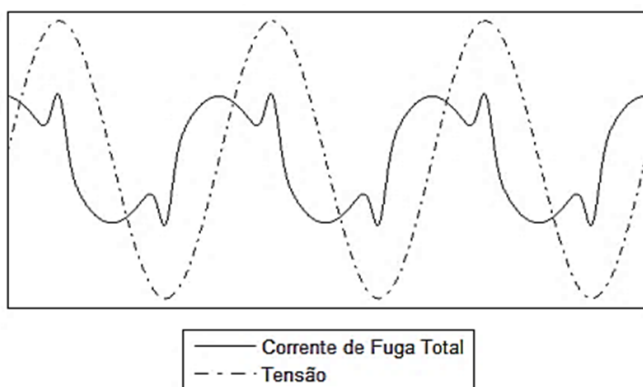


Fig. 2 Forma da tensão e corrente de fuga do para-raios em operação

Fonte: URSINE, 2013

Devido a esse comportamento, a medição da componente resistiva tornou-se um dos métodos de monitoramento de degradação do para-raios.

### 3. MÉTODO DE FILTRAGEM DIGITAL

Lira (2007) propõe que a corrente de fuga total pode ser decomposta a partir do conhecimento da capacitância  $C$  presente na Figura 3. Tal grandeza pode ser adquirida por (1).

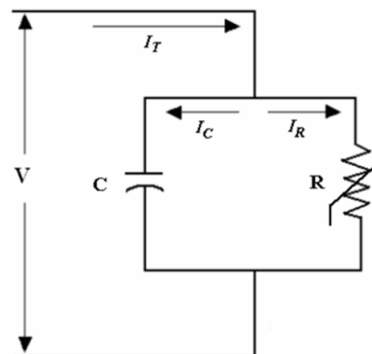


Fig. 3 Modelo elétrico simplificado do para-raios

Fonte: LIRA, 2007

$$C = \frac{I_{T(v=0)}}{2\pi f V_p} \quad (1)$$

Onde tem-se:

$I_{T(v=0)}$ : valor da corrente de fuga total no momento em que a curva da tensão intercepta o eixo das abscissas;

$f$ : frequência de amostragem

$V_p$ : valor de pico da tensão aplicada.

Com a determinação de  $C$ , a componente resistiva é encontrada por meio da equação (2) e é tida como um vetor de  $n$  amostras. A equação (3) apresenta a forma como a componente capacitiva pode ser descrita ( $I_C$ ), onde é utilizado o período de amostragem ( $T$ ).

$$I_R[n] = I_T[n] - I_C[n] \quad (2)$$

$$I_C[n] = I_T[n] - \frac{C}{T}(V[n] - V[n-1]) \quad (3)$$

### 4. METODOLOGIA

Nesse trabalho, primeiramente, foi realizado o ensaio de medição de corrente de fuga total no Laboratório de Alta e Extra-Alta Tensão (LEAT). Posteriormente, as curvas adquiridas no ensaio são carregadas na rotina computacional para efetuar a separação da corrente de fuga total.

O procedimento ilustrado na Fig. 4, consiste no ensaio gerenciado pelo sistema de controle (1), o qual aciona o transformador de excitação (2) para que este carregue a fonte série-ressonante (3); segue-se, então, a aplicação da tensão nos terminais do para-raios (4). O circuito resistivo (5) viabiliza a medição da corrente de fuga total; e o divisor de tensão capacitivo (6) mede a queda de tensão nos terminais do para-

raios. Todos os dados medidos são captados pelo osciloscópio (7) e deste, é extraído um arquivo CSV e enviado à rotina computacional (8) para a separação da corrente de fuga total em suas duas componentes: resistiva e capacitiva a partir da utilização do Método de Filtragem Digital (LIRA, 2007).

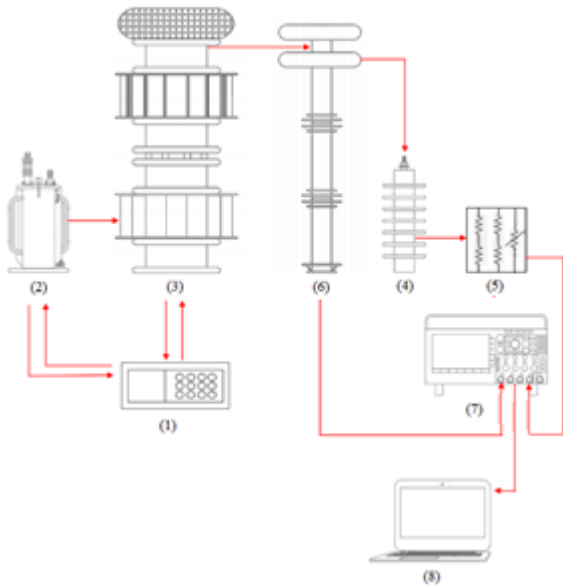


Fig. 4 Estrutura metodológica para aquisição da corrente de fuga resistiva

#### 4.1 Ensaio de medição de corrente de fuga total

Para a obtenção da curva da corrente de fuga total, utilizou-se o arranjo da Fig. 5, onde é medida a queda de tensão no divisor de tensão capacitivo e na resistência equivalente de  $1k\Omega$  contida em uma caixa de acrílico.

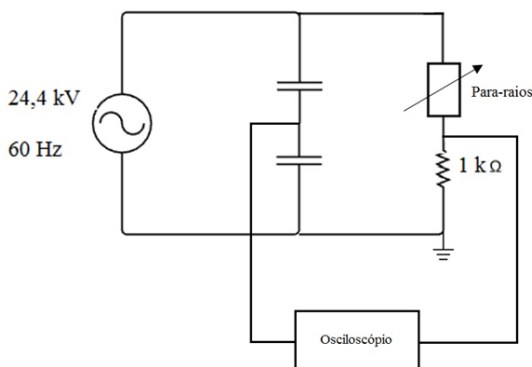


Fig. 5 Arranjo de medição de corrente de fuga total

A resistência equivalente em questão é composta por uma associação série/paralelo de resistores de  $1k\Omega$ , a qual representa um circuito resistivo; o varistor em paralelo neste circuito é responsável por impedir que haja sobretensões no circuito, além de proteger o sistema de aquisição (osciloscópio). A caixa de acrílico e as conexões mencionadas são apresentadas pelas Fig. 6 e 7, respectivamente.

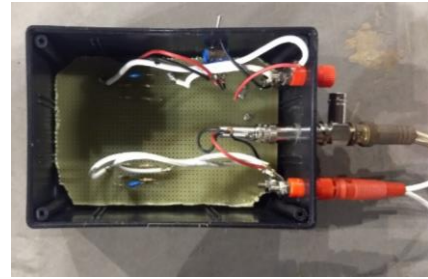


Fig. 6 Foto do circuito resistivo

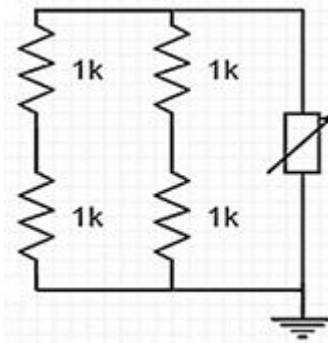


Fig. 7 Diagrama do circuito resistivo

As curvas de tensão são adquiridas por meio da utilização de um osciloscópio conectado ao circuito através de um conector BNC. Posteriormente, é calculada corrente de fuga total mediante a manipulação algébrica da Lei de Ohm, isto é, o produto entre os valores de tensão obtida e da resistência equivalente do divisor resistivo ( $1k\Omega$ ), tal qual é mostrado na equação (4).

$$I_T = \frac{U}{R_{eq}} \quad (4)$$

#### 4.2 Aquisição da componente resistiva

O código computacional obtém o valor de pico da corrente capacitiva ( $I_c$ ) quando a derivada da tensão é máxima, ou seja, no momento em que a tensão intercepta o eixo das abscissas.

Dado que a amostragem de dados obtida a partir do osciloscópio não possui o valor de tensão igual a zero, condição necessária para o cálculo da capacitância ( $C$ ), calculou-se a reatância capacitiva ( $X_c$ ) a partir da equação (5); e a capacitância, a partir da equação (6).

$$X_C = \frac{V_{pico}}{I_{pico}} \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (6)$$

O vetor de será equivalente à equação (7) e a resistiva, igual a equação (8).

$$I_C(t) = \frac{CdV(t)}{dt} \quad (7)$$

$$I_R(t) = I_T(t) - I_C(t) \quad (8)$$

## 5. RESULTADOS

A NBR 16050 (ABNT, 2010) recomenda que os ensaios de medição de corrente de fuga em para-raios de ZnO sejam realizados por, no mínimo, 10 segundos e sob uma condição de temperatura contida entre o intervalo de 5 °C a 40 °C.

Portanto, antes de realizar o ensaio visto na Fig. 8, verificou-se as condições atmosféricas da sala de testes do LEAT-UFGA; tais dados são expostos na Tabela 1.

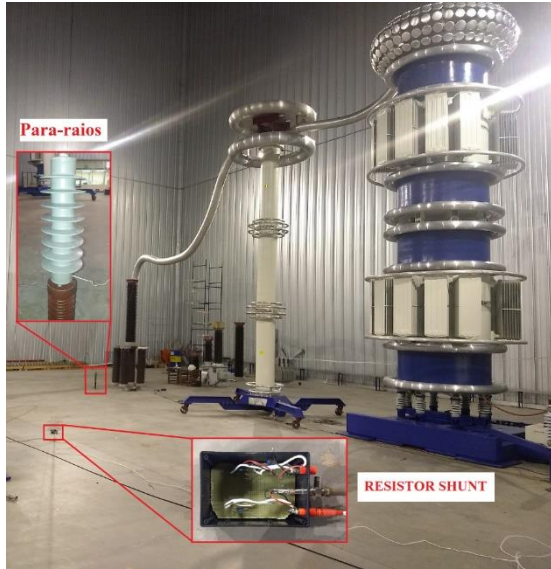


Fig. 8 Montagem do circuito de medição de corrente de fuga total

Tabela 1. Condições atmosféricas do LEAT-UFGA

Temperatura (°C)	Umidade (%)	Pressão (atm)
29,3	80,3	1

As curvas medidas durante o ensaio são adquiridas por meio da utilização do osciloscópio e mostradas na Fig. 9 a partir da captura de tela do referido equipamento. É possível observar uma reta vertical entre a extremidade da curva de tensão nos terminais do para-raios (curva azul), quando  $dV/dt=0$ , e a curva da queda de tensão resistor shunt (curva amarela). O ponto onde a reta intercepta última curva mencionada representa a corrente de fuga resistiva.

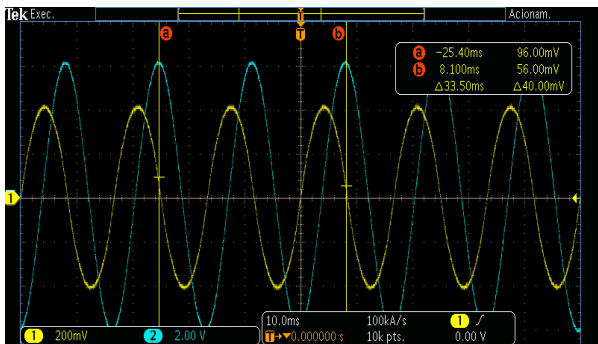


Fig. 9 Captura de tela do osciloscópio

Os valores adquiridos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de tensão e corrente medidos

Grandezas medidas	Valores
Tensão nos terminais do para-raios (rms)	25,23 kV
Queda de tensão no resistor shunt (pico)	0,432 V
Corrente de fuga total (pico)	0,432 mA

### 5.1 Aquisição da componente resistiva da corrente de fuga

É extraído do osciloscópio um arquivo de extensão CSV, o qual contém 10.000 pontos (em um intervalo de tempo entre -0,05 ms e 0,05 ms) das curvas de tensão nos terminais do para-raios e de corrente de fuga total obtidas durante o ensaio. Em seguida, o mesmo arquivo é adicionado à rotina computacional desenvolvida para obter os valores da reatância capacitiva, da capacitância e das componentes da corrente de fuga total: resistiva e capacitiva.

A curvas das correntes de fuga capacitiva e resistiva são mostradas, respectivamente, pelas Fig. 10 e Fig. 11.

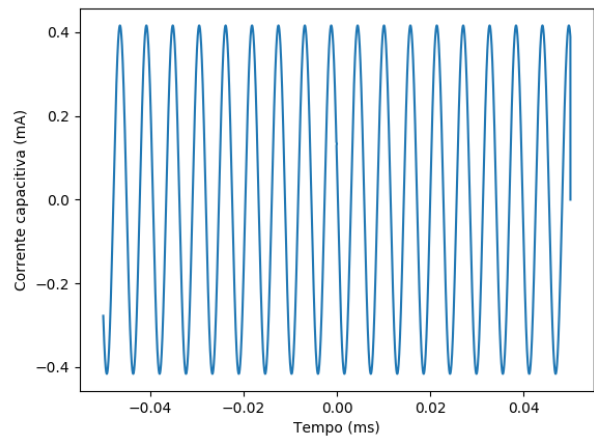


Fig. 10 Corrente de fuga capacitiva

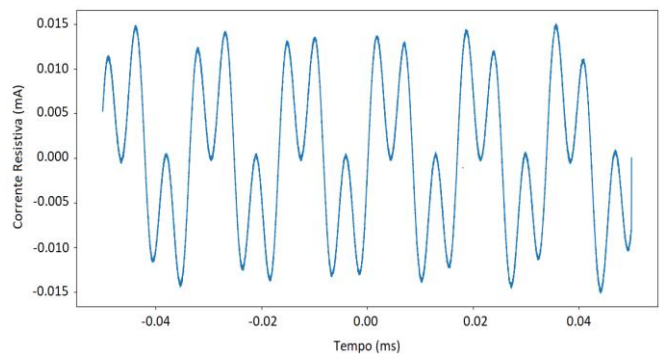


Fig. 11 Corrente de fuga resistiva

Os valores da reatância capacitiva, capacitância, correntes de fuga capacitiva e resistiva são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores calculados

Grandezas calculadas	Valores
Reatância Capacitiva ( $X_c$ )	60,65 M $\Omega$
Capacitância (C)	43,75 pF
Corrente de fuga capacitiva ( $I_c$ (pico))	0,416 mA

Corrente de fuga resistiva ( $I_r$ (pico))	0,016 mA
---	----------

URSINE, W. A. M. Monitoramento autônomo de para-raios de ZnO . Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2013.

Assim, diante dos dados adquiridos, pode-se inferir que as componentes capacitiva e resistiva equivalem, respectivamente, a aproximadamente 96,30% e 3,70% da corrente de fuga total. Portanto, pode-se afirmar que estes estão contidos na margem considerada aceitável pela literatura, onde a IEC 60099-5 (1999) define que os valores da componente resistiva de para-raios em condições normais de operação sejam em torno de 5% a 20% da corrente de fuga total.

## 6. CONCLUSÃO

A arquitetura do presente artigo cumpriu os objetivos propostos quanto à medição e à decomposição da corrente de fuga em para-raios de ZnO. Os dados adquiridos garantem a validação da rotina computacional desenvolvida – tendo em vista que estes estão de acordo com a margem de valores contidos na literatura – e a confiabilidade do Método de Filtragem Digital para decomposição de corrente de fuga total. Além disso, a metodologia proposta poderá ser usada como guia de ensaios de corrente de fuga e aquisição da componente resistiva em para-raios de ZnO de outras classes de tensão.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à PROPESP, da Universidade Federal do Pará, pelos incentivos financeiros e científicos necessários para o desenvolvimento desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 16050: “Para-raios de resistor não linear de óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada”. Rio de Janeiro, 2010.
- ÁLVARES, R. C. Diagnóstico de falhas em para-raios utilizando termografia. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2008.
- DOORSAMY, W; BOKORO, P. Condition Monitoring of Metal-oxide Surge Arresters using Leakage Current Signal Analysis. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Greece, September, 2018
- International Electrotechnical Commission. IEC 60099-4: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. 1999
- LIRA, J. G. A. Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de para-raios de Óxido de Zinco. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2007.
- LIRA, J. G. A; COSTA, E. G. MOSA Monitoring Technique Based on Analysis of Total Leakage Current. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, April, 2013