



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos



Trabalho de Conclusão de Curso

Estudo comparativo de métodos de decomposição da corrente de fuga total em para-raios de óxido de zinco

Aluno: Valdemir da Silva Brito

Orientador: George Rossany Soares de Lira

Campina Grande – PB
Dezembro – 2011

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos

Estudo comparativo de métodos de decomposição da corrente de fuga total em para-raios de óxido de zinco

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para Obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

ALUNO: _____
Valdemir da Silva Brito

ORIENTADOR: _____
George Rossany Soares de Lira

Campina Grande – PB
Dezembro – 2011

Agradecimentos

Ao professor George Lira pela orientação no desenvolvimento do trabalho e das atividades desenvolvidas no laboratório de Alta tensão, as quais foram de grande valia para a minha formação acadêmica e profissional, tendo a certeza da escolha certa da área de atuação. Agradeço também por se colocar sempre a disposição para sanar dúvidas existentes, pelo incentivo e confiança em mim depositada.

Aos professores Edson Guedes e Tarso Vilela pelo apoio concedido em um momento extremamente difícil da minha vida, apoio este que me rendeu a permanência na Universidade, o que possibilitou a execução deste trabalho, e a descoberta de uma área extremamente nobre da engenharia elétrica, a área de sistemas elétricos de potência, pela qual me sinto realizado profissionalmente.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica – DEE por contribuírem para a minha formação acadêmica, e por desempenharem um papel de extrema importância para a sociedade.

Aos amigos descobertos no curso de graduação: Arthur Dantas, Laécio Trajano, Bruno Santos, João Paulo Pereira e Miquéias Melo, pelas noites estudando juntos e pela união durante o curso, o que contribui significativamente para a conclusão do curso.

Aos meus pais Manuel Dias de Brito e Marina da Silva Brito, pela minha vida, pelo exemplo de dedicação e perseverança, pela compreensão, carinho e amor.

Aos meus irmãos Vanderlei da Silva Brito e Vanderleya da Silva Brito, pela amizade, pelo apoio e pela confiança.

À minha esposa Samara Gomes Santos pela confiança, pela compreensão da minha ausência em muitos momentos da sua vida, pelo apoio, incentivo, dedicação e amor. Agradeço também pelo filho que me concedeu.

Ao meu filho Gabriel Gomes Brito, que apesar da pouca idade, representa muito em minha vida, posso dizer que é a minha fonte de inspiração.

Sumário

Lista de Figuras	4
1. Introdução	5
1.1 Objetivos.....	6
1.2 Metodologia.....	6
2. Revisão Bibliográfica	7
2.1 Método da compensação diferencial capacitiva	7
2.2 Método da medição do pico da componente resistiva da corrente de fuga	8
2.3 Método point-on-wave (POW).....	9
2.4 Método da compensação com ponte virtual	11
2.5 Método da medição da diferença de fase.....	12
2.6 Método iterativo da diferença de fase.....	14
2.7 Método do deslocamento de fase	15
2.8 Método da filtragem digital	16
2.9 Método do deslocamento da corrente modificado (MSCM).....	17
3. Método experimental de referência	18
4. Simulação de métodos para decomposição da corrente resistiva	21
4.1 Algoritmo e simulação do método da medição do pico da componente resistiva da corrente de fuga	21
4.2 Algoritmo e simulação do método da compensação com ponte virtual	23
4.3 Algoritmo e simulação do método do deslocamento de fase	25
4.4 Algoritmo e simulação do método do deslocamento da corrente modificado (MSCM)	27
4.5 Algoritmo e simulação do método da filtragem digital	30
5. Análise dos resultados	33
5.1 Simulação do método da medição do pico da componente resistiva da corrente de fuga	33
5.2 Simulação do método da compensação com ponte virtual.....	34
5.3 Simulação do método do deslocamento de fase	34
5.4 Simulação do método do deslocamento da corrente modificado (MSCM).....	35
5.5 Simulação do método da filtragem digital.....	36
6. Conclusões.....	37
7. Referências Bibliográficas.....	39

Lista de Figuras

Figura 1 - Método da compensação diferencial capacitiva (Meira et al.,1983).	7
Figura 2 - Formas de onda da tensão aplicada ao para-raios e sua corrente de fuga.....	9
Figura 3 - Circuito equivalente simplificado do para-raios (ZnO).....	10
Figura 4 - Método da compensação com ponte virtual.	11
Figura 5 - Diagrama fasorial da tensão e corrente no para-raios (ZnO).....	13
Figura 6 - Circuito com um divisor resistivo para medição de fase.	13
Figura 7 - Relação entre o valor de pico da componente resistiva e a diferença de fase (Karawita, 2006).....	14
Figura 8 - Processo iterativo para determinação da corrente resistiva (Karawita, 2006).	15
Figura 9 - Representação fasorial da obtenção do dobro da corrente capacitiva.	16
Figura 10 - Esquema do arranjo experimental utilizado.....	19
Figura 11 - Formas de onda da tensão aplicada ao varistor e da corrente de fuga.	20
Figura 12 - Formas de onda da tensão aplicada ao varistor e da corrente resistiva obtida utilizando o método da compensação diferencial capacitiva.....	20
Figura 13 - Simulação do método da medição do pico da corrente resistiva.	23
Figura 14 - Simulação do método da ponte virtual.	25
Figura 15 - Simulação do método do deslocamento de fase.	27
Figura 16 - 1º Simulação do método do deslocamento da corrente modificado (MSCM) (a) Corrente total e corrente total deslocada; (b) Correntes somadas; (c) Corrente capacitiva gerada; (d) Corrente resistiva.	29
Figura 17 - 2º Simulação do método do deslocamento da corrente modificado (MSCM).	29
Figura 18 - Forma de onda da tensão original e reconstituída.....	32
Figura 19 - Simulação do método da filtragem digital.....	32

1. Introdução

Os para-raios de óxido de zinco (ZnO) são dispositivos essenciais na proteção de equipamentos dos sistemas elétricos, principalmente contra sobretensões atmosféricas e de manobra, e descargas de alta intensidade e curta duração.

Nos sistemas elétricos os para-raios de ZnO são normalmente instalados entre a fase e a terra, de modo que uma pequena corrente de fuga, na ordem de microampères, circula continuamente pelos varistores quando em regime normal de operação. Devido à alta capacidade de absorção de energia e característica (V-I) altamente não linear, a corrente de fuga que era da ordem de microampères pode chegar a quiloampères durante a passagem de uma descarga elétrica, e cessada a descarga o para-raios deve voltar a operar normalmente.

Devido à importância dos para-raios para os sistemas elétricos faz-se necessário a utilização de técnicas e procedimentos para o correto monitoramento e diagnóstico do estado dos para-raios instalados em campo, pois eventuais falhas nos para-raios podem conduzir a desligamentos não programados, danos a outros equipamentos de uma subestação e principalmente, podem implicar em risco de morte aos profissionais que trabalham em campo. Tudo isso se traduz em prejuízos financeiros às concessionárias de energia elétrica, sejam através de multas por parte dos órgãos reguladores, processos judiciais ou danos à imagem das empresas.

A corrente de fuga total em um para-raios é formada por uma componente capacitiva e outra resistiva, onde a componente capacitiva poder ser considerada linear e a resistiva é não-linear, sendo que para região de operação do para-raios a componente resistiva representa cerca de 10% da corrente de fuga total. Estudos mostram que a componente resistiva da corrente de fuga e seus harmônicos estão ligados diretamente a degradação do para-raios. A separação da componente resistiva da corrente de fuga não é algo trivial, principalmente devido a não linearidade da corrente resistiva e da influência de harmônicos da tensão do sistema. Com o objetivo de separar a componente resistiva da corrente de fuga, vários métodos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos, e este trabalho pretende comparar a eficácia de alguns dos métodos propostos.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso foram divididos em duas partes, o objetivo geral e os objetivos específicos.

- **Geral:**

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo comparativo dos métodos de decomposição da corrente de fuga em para-raios de óxido de zinco (ZnO) propostos em artigos científicos, ressaltando as vantagens e desvantagens de cada um.

- **Específicos:**

- Verificar se os métodos propostos podem ser aplicados em um sistema elétrico real.
- Realizar simulações tendo como saída formas de onda da tensão aplicada ao para-raios e a componente resistiva da corrente de fuga, de métodos que até então apenas eram descritos matematicamente.
- Demonstrar através de simulações a eficácia de alguns métodos e as limitações de outros.

1.2 Metodologia

Este trabalho será iniciado com uma revisão bibliográfica sobre os métodos de decomposição da corrente de fuga conhecidos no meio acadêmico.

Em seguida, será realizada a formulação dos algoritmos para simulação, tendo o Matlab® como plataforma de simulação.

Posteriormente, será realizada a simulação dos métodos utilizando o software Matlab®.

Por fim, serão comparados os métodos através dos resultados obtidos nas simulações e dos conhecimentos adquiridos durante a revisão bibliográfica e durante todo o trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Método da compensação diferencial capacitiva

O método da compensação diferencial capacitiva bastante consolidado no meio acadêmico se propõe a separar a componente resistiva da corrente de fuga utilizando para isso o arranjo observado na Figura 1.

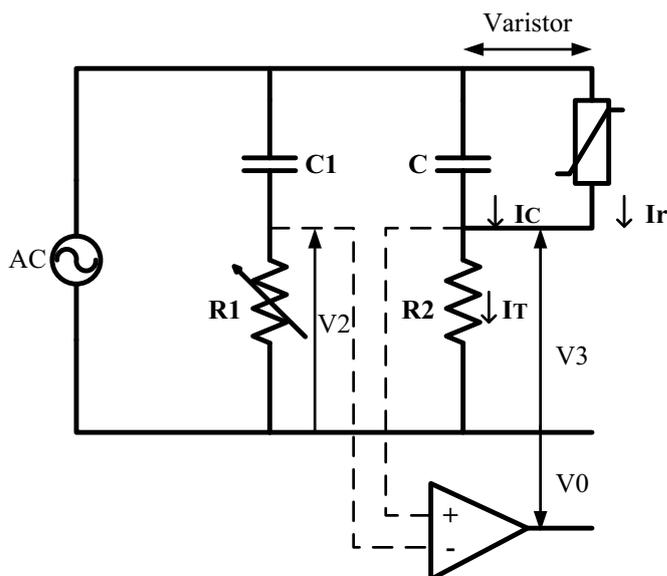


Figura 1 - Método da compensação diferencial capacitiva (Meira et al.,1983).

O Ramo R_1C_1 adicional é responsável por gerar uma corrente capacitiva de mesmo valor da componente capacitiva da corrente de fuga. O resistor variável R_1 é responsável pelo ajuste da corrente que passa pelo ramo com a componente capacitiva da corrente de fuga. O subtrator irá subtrair da corrente de fuga a corrente capacitiva gerada pelo ramo R_1C_1 . A saída do subtrator será a componente resistiva da corrente de fuga.

Para que seja possível igualar a corrente do ramo R_1C_1 com a componente capacitiva da corrente de fuga, se faz necessário obter o sinal da tensão aplicada ao para-raios. Com o sinal da tensão e da saída do subtrator visualizado no osciloscópio, ajusta-se o valor da resistência R_1 até que o sinal da saída do subtrator esteja em fase com o sinal da tensão aplicada. Nesse momento o sinal na saída do subtrator será igual a componente resistiva da corrente de fuga, tendo em vista que a corrente resistiva está em fase com a tensão aplicada. A técnica está sujeita a erros de leitura, pois o ajuste da

fase da tensão aplicada com a fase do sinal na saída do subtrator é realizado pela leitura visual do operador.

Na aplicação do método se faz necessário a utilização de um capacitor com tangente de perdas muito baixa, idealmente zero. O capacitor deve ter baixíssima capacitância para que sua reatância capacitiva seja muito superior a resistência R_1 , tornando o ramo praticamente capacitivo. Além disso, o capacitor deve suportar praticamente toda a tensão aplicada ao para-raios. Devido à necessidade do sinal da tensão aplicada ao para-raios e a necessidade de um capacitor de altíssima qualidade, o método da compensação diferencial capacitiva tem se restringido a ensaios em laboratório.

2.2 Método da medição do pico da componente resistiva da corrente de fuga

O método da medição do pico da componente resistiva da corrente de fuga descrito por Hinrichsen (1997) tem como base a informação de que o pico da corrente resistiva coincide com o ponto de derivada nula da tensão, que para uma fonte de tensão capaz de gerar uma senoide pura, ou seja, sem distorção harmônica, corresponde ao seu valor máximo.

O método é deduzido matematicamente pelas equações (01), (02) e (03) e observado graficamente na Figura 2.

É sabido que:

$$I_T(t) = I_R(t) + I_C(t) \quad (01)$$

$$\text{e } I_C(t) = C \frac{dV(t)}{dt} \quad (02)$$

$$\text{Sendo assim, quando } \frac{dV(t)}{dt} = 0 \text{ tem-se } i_t = i_r \quad (03)$$

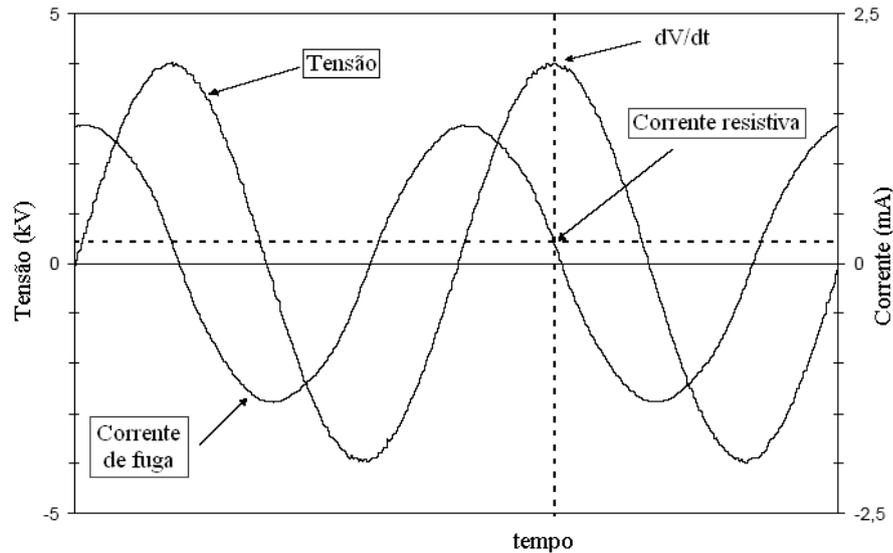


Figura 2 - Formas de onda da tensão aplicada ao para-raios e sua corrente de fuga.

Uma dificuldade da implementação deste método é a necessidade de se obter a forma de onda da tensão aplicada ao para-raios, pois para essa finalidade geralmente se utiliza um sensor de campo próximo ao para-raios, e tendo no sistema trifásico fases adjacentes ao para-raios que se deseja avaliar, é difícil confirmar se a tensão capturada é igual à tensão aplicada ao para-raios avaliado.

Outro problema é a presença de harmônicos na tensão do sistema, provocando uma distorção da forma de onda da tensão, dificultando a determinação exata da passagem da tensão aplicada pelo seu valor máximo. Dependendo do grau de distorção pode se ter mais de um ponto de derivada nula, comprometendo a medição da corrente resistiva.

2.3 Método point-on-wave (POW)

O método *Point-on-Wave* (POW) desenvolvido por Spellman e Haddad (1997) tem como base um sistema de equações, através do qual a corrente resistiva é determinada a partir dos valores da tensão e da corrente de fuga total no circuito equivalente simplificado do para-raios observado na Figura 3.

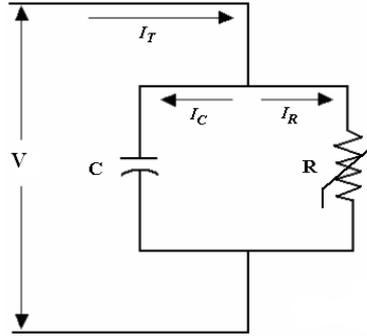


Figura 3 - Circuito equivalente simplificado do para-raios (ZnO).

A equação (04) descreve uma expressão para a corrente de fuga total utilizando o circuito equivalente da Figura 3.

$$I_T(t) = I_C(t) + I_r(t) = C \frac{dV(t)}{dt} + I_r(t) \quad (04)$$

onde I_T corresponde à corrente de fuga total, I_C a sua componente capacitiva e I_r a sua componente resistiva.

O equacionamento necessário para a solução do método partiu da análise de que a cada meio ciclo, em uma forma de onda sem harmônicos, um mesmo valor de tensão irá se repetir duas vezes, com exceção do valor de pico que ocorre uma única vez. Tomando os valores da corrente nos tempos t_1 e t_2 , para os quais a tensão tem o mesmo valor obtém-se:

$$I_T(t_1) = I_C(t_1) + I_r(t_1) = C \frac{dV(t_1)}{dt} + I_r(t_1) \quad (05)$$

$$I_T(t_2) = I_C(t_2) + I_r(t_2) = C \frac{dV(t_2)}{dt} + I_r(t_2) \quad (06)$$

Por $V(t_1) = V(t_2)$, tem-se que $I_r(t_1) = I_r(t_2)$, sendo assim, subtraindo a equação (05) de (06) obtém-se a equação (07).

$$C = \frac{I_T(t_1) - I_T(t_2)}{\frac{dV(t_1)}{dt} - \frac{dV(t_2)}{dt}} \quad (07)$$

Relacionando as equações (05), (06) e (07) pode ser obter a equação (08) para determinação de $I_r(t)$.

$$I_r(t_1) = I_r(t_2) = \left(\frac{I_T(t_1) + I_T(t_2)}{2} \right) - \left(\frac{I_T(t_1) - I_T(t_2)}{2} \right) \cdot \left(\frac{\frac{dV(t_1)}{dt} + \frac{dV(t_2)}{dt}}{\frac{dV(t_1)}{dt} - \frac{dV(t_2)}{dt}} \right) \quad (08)$$

Por meio da equação (08), pode-se calcular a componente resistiva da corrente de fuga em um ciclo completo para qualquer forma de onda, desde que, sejam adquiridos alguns pontos da tensão e da corrente; e, principalmente, que a tensão fornecida seja senoidal, sem componentes harmônicas, ou apenas com componentes ímpares e sem deslocamento de fase.

2.4 Método da compensação com ponte virtual

O método da compensação com ponte virtual proposto por Souza (2004) é uma evolução do método da compensação diferencial capacitiva. Nesse método a componente resistiva da corrente de fuga é obtida por rotina computacional. As principais vantagens do método com relação ao anterior são: a substituição do ramo R_1C_1 , principalmente do capacitor real por um capacitor virtual ideal ($tg \delta = 0$), e a eliminação do erro da leitura visual do operador no ajuste das fases da componente resistiva com a tensão aplicada, sendo o processo substituído por um algoritmo computacional.

Na Figura 4 é visualizado o circuito que deve ser implementado em uma rotina computacional.

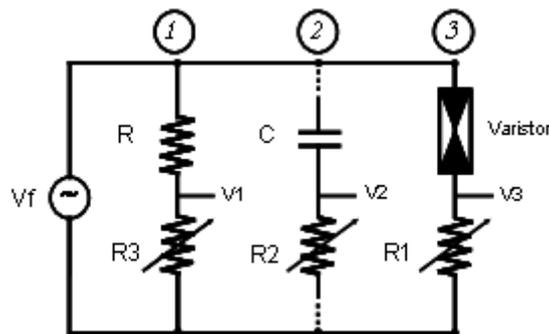


Figura 4 - Método da compensação com ponte virtual.

Para implementação do método em um sistema real se faz necessário obter os vetores de pontos da tensão aplicada ao para-raios (tensão V_f obtida através do ponto V_1 do divisor resistivo da Figura 4), e da corrente de fuga (ponto V_3 da Figura 4), necessitando portando de um dispositivo que armazene estes dados, como por exemplo um osciloscópio digital. Com a obtenção da forma de onda aplicada ao para-raios e sua corrente de fuga calcula-se o sinal V_2 (sinal virtual do ramo RC), para isso é utilizado a equação (09).

$$V_2 = \frac{V_{f1}}{|Z_1|} \text{sen}(wt + \theta_{f1} + \phi_1) + \frac{V_{f2}}{|Z_2|} \text{sen}(wt + \theta_{f2} + \phi_2) + \dots + \frac{V_{fn}}{|Z_n|} \text{sen}(wt + \theta_{fn} + \phi_n) \quad (09)$$

Em que, V_{fn} é a amplitude do n-ésimo harmônico da tensão, w é a frequência angular do sinal de tensão em radianos, θ_{fn} é o ângulo de fase do n-ésimo harmônico da tensão em graus, t representa a variação no tempo em segundos, $Z_n = R_2 - j \cdot \left(\frac{1}{n\omega C}\right)$, onde C é a capacitância observada na Figura 4, $|Z_n|$ é o valor absoluto de Z_n e ϕ_n é o ângulo de Z_n .

Para eliminar o efeito da componente resistiva do ramo RC de compensação, calcula-se a parte imaginária do sinal V_2 , utilizando para isso análise de circuito de 1º ordem, obtendo o sinal V_{2c} .

Para a aplicação do método calcula-se o sinal V_{32} ($V_3 - V_{2c}$), verifica se o sinal V_{32} e V_f estão em fase, caso os sinais estejam em fase, calcula-se a corrente resistiva pela equação (10), caso não estejam em fase realiza um incremento no valor da resistência R_2 até que os sinais V_{32} e V_f estejam em fase.

$$i_r = \frac{V_{32}}{R_1} \quad (10)$$

2.5 Método da medição da diferença de fase

O método da medição da diferença de fase observado por (Lira *et al.*, 2005) consiste em medir a defasagem θ entre a tensão aplicada ao para-raios e a corrente de fuga. O método utiliza como base a informação de que a componente resistiva da corrente esta em fase com a tensão, como observado no diagrama vetorial da Figura 5.

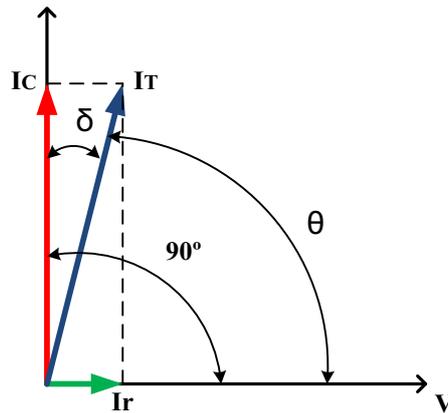


Figura 5 - Diagrama fasorial da tensão e corrente no para-raios (ZnO).

De acordo com o método, a partir do ângulo de defasagem θ entre a tensão e a corrente de fuga é possível medir a corrente resistiva a partir da equação $I_R = I_T \cos \theta$.

Na Figura 6 é observado o arranjo experimental que pode ser utilizado para medir a defasagem entre a tensão aplicada ao para-raios e a corrente de fuga.

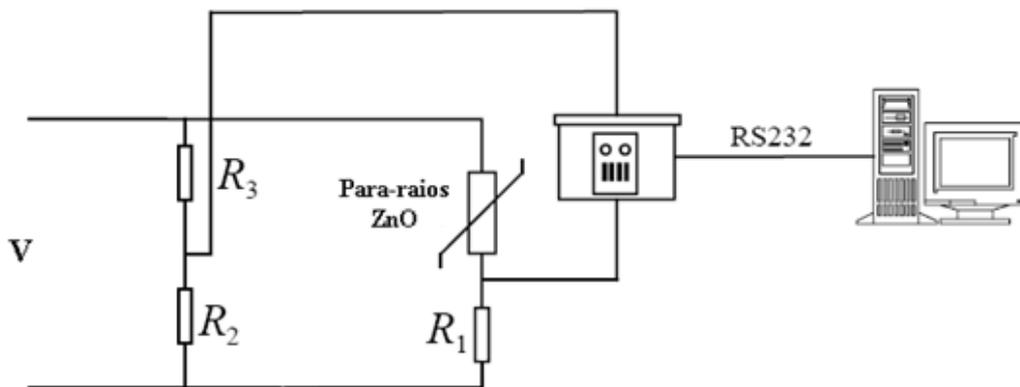


Figura 6 - Circuito com um divisor resistivo para medição de fase.

A principal dificuldade deste método é o fato das formas de onda da tensão e da corrente de fuga não serem senoides puras, como consequência a relação entre a tensão aplicada ao para-raios e a corrente de fuga não possui um ângulo de defasagem fixo. Se para formas de onda da tensão e da corrente de fuga muito distorcidas forem medido a defasagem a partir dos pontos de cruzamento por zero, serão consideradas apenas as componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente, o que causaria um elevado erro de medição.

2.6 Método iterativo da diferença de fase

O método iterativo da diferença de fase surgiu da observação experimental descrita por Karawita (2006). Nos experimentos foi observada uma relação única entre o valor de pico da componente fundamental da corrente de fuga resistiva e o deslocamento de fase entre a componente fundamental da corrente capacitiva e a componente fundamental da corrente de fuga total, como pode ser observado na Figura 7.

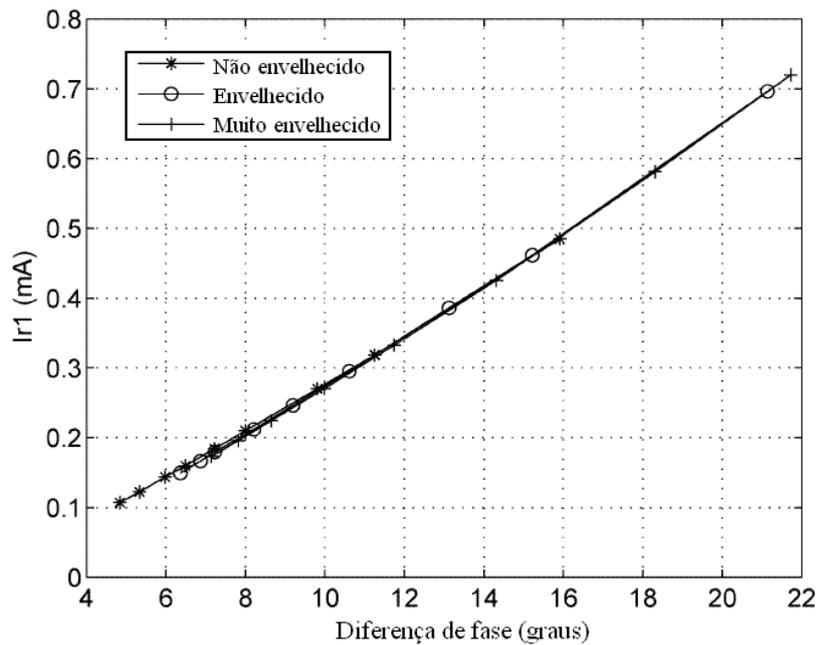


Figura 7 - Relação entre o valor de pico da componente resistiva e a diferença de fase (Karawita, 2006).

A relação entre a componente resistiva e a diferença de fase é única para o parâmetros de ZnO ensaiado, e pode ser considerado linear dentro da faixa de operação de 0,8 a 1,0 do dispositivo. A partir da relação formulou-se a equação (11), sendo os parâmetros A e B determinados através de ensaios em laboratório, onde são medidos o valor de pico da componente fundamental da corrente de fuga resistiva e o deslocamento de fase entre a componente fundamental da corrente capacitiva e a componente fundamental da corrente de fuga total para diferentes valores de tensão.

A equação (12) relaciona a componente da corrente de fuga resistiva com a corrente de fuga total, donde φ_{C1T1} representa o deslocamento de fase entre a

componente fundamental da corrente capacitiva e a componente fundamental da corrente de fuga total.

$$I_{R1\ pico} = A\varphi_{C1T1} + B \quad (11)$$

$$I_{R1\ pico} = I_{T1\ pico} \text{sen}(\varphi_{C1T1}) \quad (12)$$

Determinados os valores de A e B, a componente resistiva da corrente de fuga total é determinada apenas com a medição da corrente de fuga total e o uso de um processo iterativo computacional, como pode ser observado na Figura 8, utilizando no cálculo as equações (11) e (12).

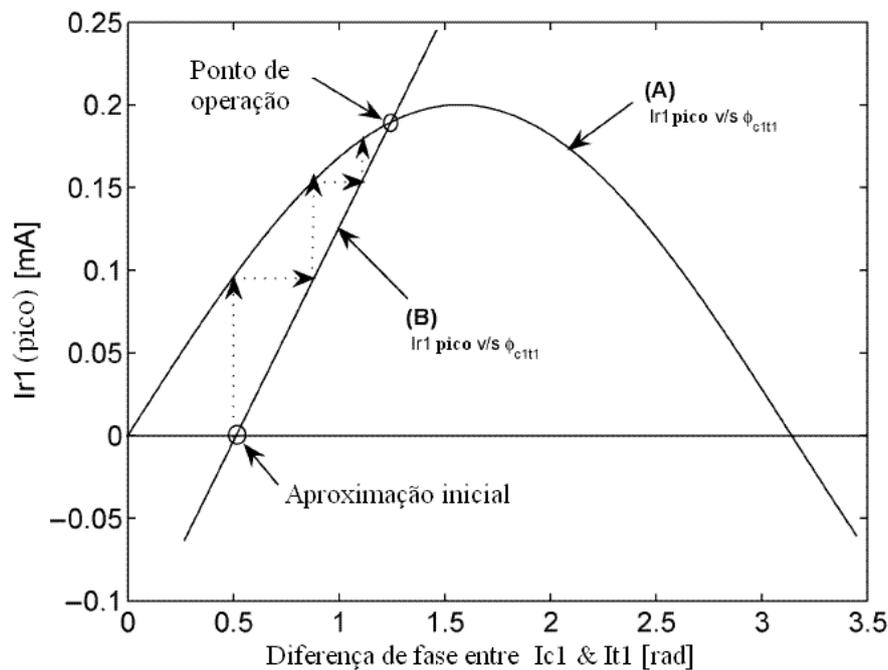


Figura 8 - Processo iterativo para determinação da corrente resistiva (Karawita, 2006).

2.7 Método do deslocamento de fase

O método do deslocamento de fase proposto por Lira (2007) fundamenta-se na observação de que o sinal da corrente de fuga total $I_T(\omega t)$ quando somado ao sinal da corrente de fuga total defasado de $(\pi - 2\phi)$, ou seja, $I_T(\omega t + \pi - 2\phi)$ resulta no dobro do valor da componente da corrente de fuga capacitiva $I_C(t)$, sendo ϕ o ângulo de fase entre a corrente $I_T(t)$ e a tensão aplicada $V(t)$ sobre o para-raios. A representação vetorial da obtenção do dobro do vetor da corrente capacitiva é observada na Figura 9.

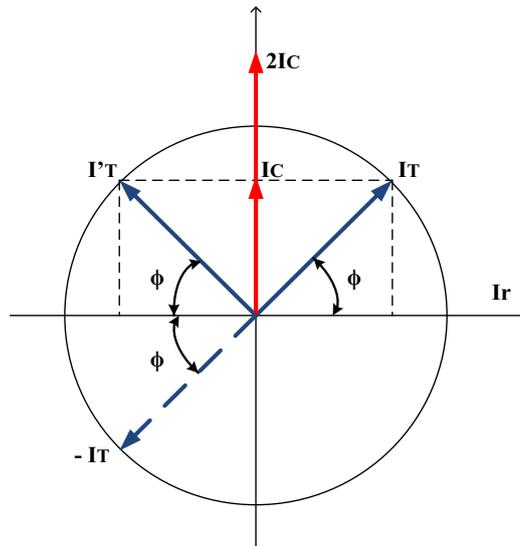


Figura 9 - Representação fasorial da obtenção do dobro da corrente capacitiva.

De acordo com o método a corrente capacitiva pode ser obtida pela equação (13).

$$I_C = \frac{I_T(\omega t) + I_T(\omega t + \pi - 2\phi)}{2} \quad (13)$$

Determinado o valor da componente capacitiva, a componente resistiva da corrente de fuga pode ser determinada subtraindo a componente capacitiva da corrente de fuga, como observado na equação (14).

$$I_r = I_T(\omega t) - I_C \quad (14)$$

2.8 Método da filtragem digital

O método da filtragem digital proposto por Lira (2007) baseia-se na determinação da corrente de fuga resistiva, a partir da estimação do valor da capacitância C , observada no circuito simplificado do para-raios, usando-se a expressão da equação (21), em que T e f representam, respectivamente, o período e a frequência de amostragem.

O valor de C pode ser estimado pela dedução das equações a seguir:

$$I_C = C \frac{dV(t)}{dt} \quad (15)$$

Sendo $V(t) = V_p \text{sen} \omega t$, temos que:

$$I_C = C \frac{dV_p \text{sen} \omega t}{dt} = C \omega V_p \text{cos} \omega t \quad (16)$$

Para o valor de pico da componente capacitiva, temos que:

$$I_{C \text{pico}} = C \omega V_p = C 2\pi f V_p \quad (17)$$

Analisando a equação (15), percebe-se que a componente capacitiva é máxima no ponto de máxima derivada, e isto ocorre no ponto de cruzamento da tensão por zero. Sendo assim, a capacitância C pode ser determinada pela equação (18).

$$C = \frac{I_{V=0}}{2\pi f V_p} \quad (18)$$

A partir da determinação de C pode ser determinada a componente resistiva, de acordo com o desenvolvimento matemático a seguir:

$$I_R[n] = I_T[n] - I_C[n] \quad (19)$$

$$I_R[n] = I_T[n] - \frac{C}{T} (V[n] - V[n-1]) \quad (20)$$

$$\frac{I_T[n] - I_R[n]}{V[n] - V[n-1]} = \frac{C}{T} = fC \quad (21)$$

Onde, $I_T[n]$ e $V[n]$ correspondem aos vetores de n pontos do sinal da corrente de fuga e tensão aplicada ao para-raios respectivamente.

Uma limitação deste método é devido ao fato de que cada para-raios possui um valor diferente para a capacitância C , exigindo assim uma medição individualizada para cada equipamento. Além disso, o sinal da tensão é considerado senoidal, desprezando assim seus harmônicos.

2.9 Método do deslocamento da corrente modificado (MSCM)

O método proposto por Abdul-Malek e Aulia (2008) baseia-se no circuito simplificado do para-raios, ou seja, um capacitor em paralelo com um resistor variável, conforme observado na Figura 3. Através do circuito equivalente simplificado é deduzida a equação (22):

$$I_T(t) = I_C(t) + I_r(t) \quad (22)$$

Onde $I_T(t)$ é a corrente de fuga total, $I_C(t)$ é a componente capacitiva e $I_r(t)$ é a componente resistiva. A componente resistiva pode ser obtida subtraindo a componente capacitiva da corrente de fuga, como observado na equação (23).

$$I_r(t) = I_T(t) - I_C(t) \quad (23)$$

A equação (22) pode ser reescrita como observado na equação (24).

$$I_T(t) = I_C \cos \omega t + [I_r] \quad (24)$$

Sendo $[I_r]$ a componente resistiva da corrente (incluindo todos os harmônicos).

Para a realização do método utilizam-se os passos descritos a seguir. Determina-se o período do sinal da corrente; desloca-se a corrente de fuga de 90° e soma com a corrente de fuga original; em seguida determina-se o instante de tempo correspondente ao pico da soma das correntes, esse instante é o mesmo para o pico da corrente resistiva, que é o mesmo para o pico da tensão; do tempo obtido no passo anterior é subtraído ou adicionado um tempo equivalente a $1/4$ do período do sinal da corrente; o novo instante de tempo obtido corresponde ao instante de tempo associado ao valor de pico da corrente capacitiva; determina o valor de pico da corrente capacitiva, extraindo da forma de onda da corrente de fuga original, o valor da corrente no instante de tempo obtido anteriormente; é gerado um sinal da corrente capacitiva conhecendo-se a frequência do sinal, o valor de pico da corrente capacitiva, e o instante de tempo correspondente a este valor, a corrente capacitiva gerada é igual a observada na equação (24); a componente resistiva é obtida subtraindo a componente capacitiva gerada da corrente de fuga original, conforme verificado na equação (23).

A vantagem deste método é a obtenção da componente resistiva, sem a necessidade do sinal da tensão aplicada ao para-raios. A principal desvantagem é a consideração de que a componente capacitiva da corrente de fuga é senoidal, desprezando os harmônicos gerados por uma tensão distorcida.

3. Método experimental de referência

A fim de comparar a eficácia dos métodos foi realizado um ensaio utilizando o método da compensação diferencial capacitiva. Para a realização do ensaio foi utilizado o arranjo experimental ilustrado na Figura 10. O circuito é composto por uma mesa de controle com fonte de tensão senoidal regulável (0 – 220 V), um transformador elevador de tensão (0 – 100 kV), uma resistência de proteção (282 k Ω), um ramo RC (capacitor

de 1200 pF em série com um resistor R1 variável), um divisor resistivo (280 MΩ e 100 kΩ - utilizado para medir a tensão no varistor) e o varistor à ZnO (objeto de teste) em série com uma resistência “Shunt” (R_{shunt}).

O varistor é o principal elemento de um para-raios, ele apresenta alta não linearidade entre a tensão e a corrente. O varistor corresponde a uma estrutura cilíndrica e seu diâmetro é escolhido de acordo com a capacidade de absorção de energia desejada, variando de 30 mm para sistemas de distribuição até 100 mm ou mais para sistemas de alta ou extra-alta tensão.

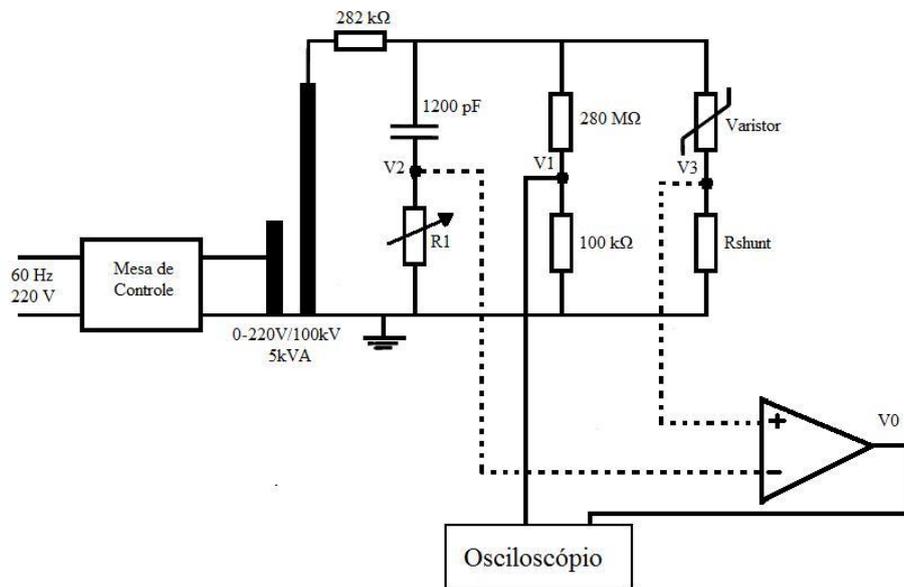


Figura 10 - Esquema do arranjo experimental utilizado.

Como discutido na revisão bibliográfica, o resistor R1 é ajustado até que a saída V0 ($V3 - V2$) esteja em fase com a tensão aplicada ao varistor, nesse momento a componente capacitiva da corrente de fuga está compensada. A operação de subtração entre os sinais V3 e V2 foi realizada pela função *Math* do osciloscópio digital utilizado.

Para que fosse possível a observação dos sinais V0 e V1 em fase, o resistor R1 foi incrementado gradualmente, e a cada incremento os sinais eram observados na tela do osciloscópio. Os sinais ficaram em fase quando o resistor R1 foi ajustado para um valor de 215 Ω.

As formas de onda da tensão aplicada ao varistor e da corrente de fuga são observadas na Figura 11. Na Figura 12 são observadas as formas de onda da tensão aplicada ao varistor e a corrente resistiva obtida utilizando o método da compensação diferencial capacitiva.

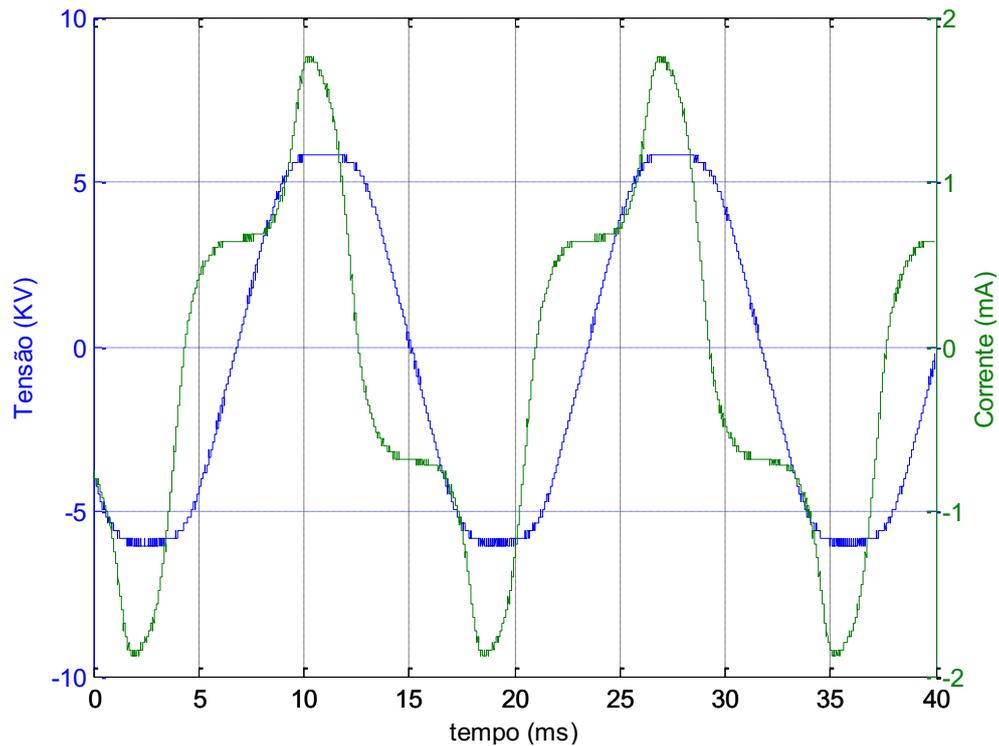


Figura 11 - Formas de onda da tensão aplicada ao varistor e da corrente de fuga.

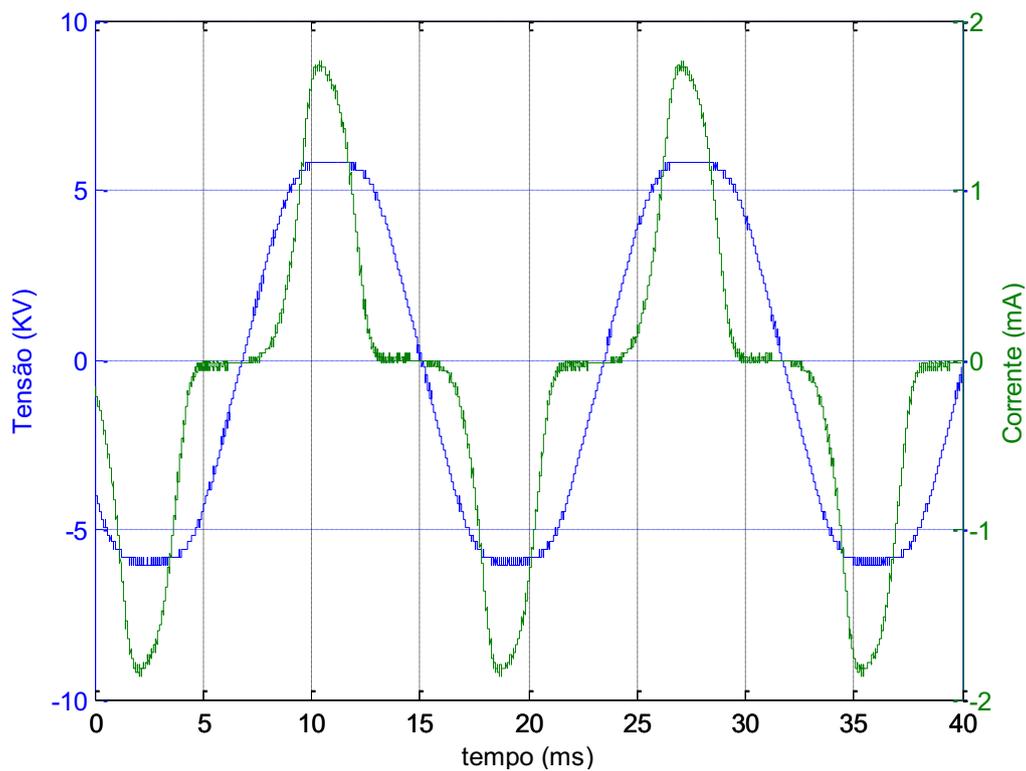


Figura 12 - Formas de onda da tensão aplicada ao varistor e da corrente resistiva obtida utilizando o método da compensação diferencial capacitiva.

Na Figura 12 observa-se que a corrente resistiva obtida utilizando o método da compensação diferencial capacitiva apresenta uma pequena defasagem com relação à tensão aplicada ao varistor, isso se deve ao ramo RC utilizado na compensação não ser

completamente capacitivo e ao erro de leitura no momento do ajuste visual no osciloscópio. Esses problemas já foram discutidos na revisão bibliográfica.

Apesar dos erros apresentados, o método da compensação diferencial capacitiva será utilizado como método de referência para comparar com os métodos abordado para simulação, devido principalmente ao método ser obtido experimentalmente. Um dos parâmetros utilizados para a comparação será o valor de pico da componente resistiva, que para o método experimental de referência o valor obtido foi de 1,760 miliâmpères.

4. Simulação de métodos para decomposição da corrente resistiva

Devido ao tempo de execução do trabalho ser dividido com o tempo disponível para as disciplinas da graduação, foram escolhidos cinco métodos para análise e simulação dos 9 métodos apresentados na revisão bibliográfica, são eles:

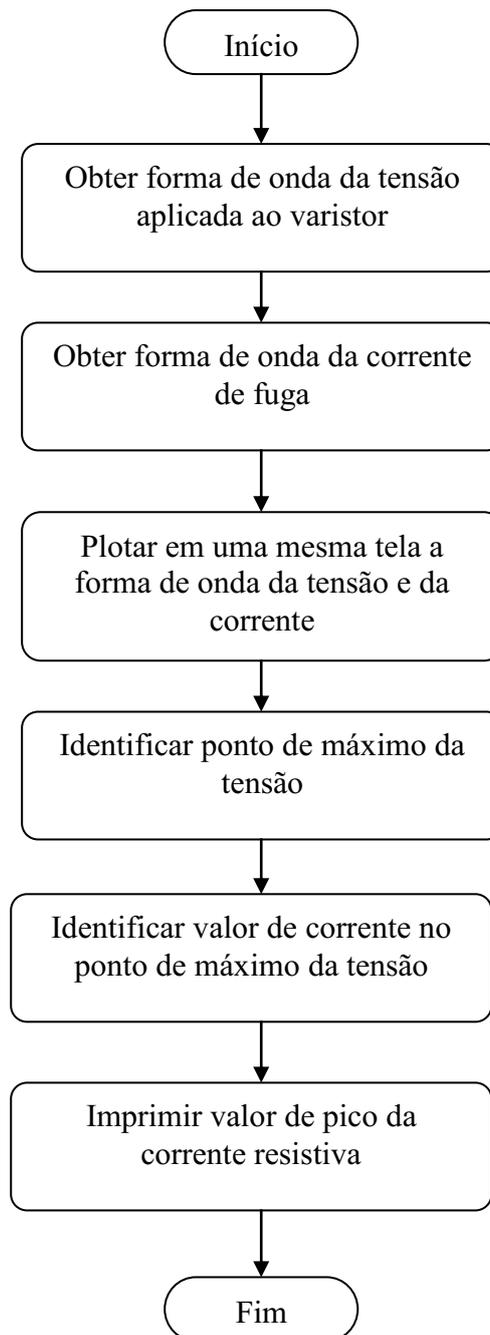
- Método da medição do pico da componente resistiva da corrente de fuga;
- Método da compensação com ponte virtual;
- Método do deslocamento de fase;
- Método do deslocamento da corrente modificado (MSCM);
- Método da Filtragem Digital.

Para a implementação da simulação dos métodos foram formulados os algoritmos para cada método. Em seguida, o algoritmo foi implementado utilizando como plataforma de simulação o software Matlab®.

4.1 Algoritmo e simulação do método da medição do pico da componente resistiva da corrente de fuga

Com base no método exposto na revisão bibliográfica, o algoritmo a seguir descreve os passos necessários para a obtenção do pico da corrente resistiva.

Algoritmo: Método da medição do pico da corrente resistiva



Utilizando como base o algoritmo descritivo acima, o valor de pico da corrente resistiva foi obtido e é igual a 1,480 miliamperes. As formas de onda da tensão e corrente com o detalhe da localização do valor de pico da corrente resistiva são observadas na Figura 13.

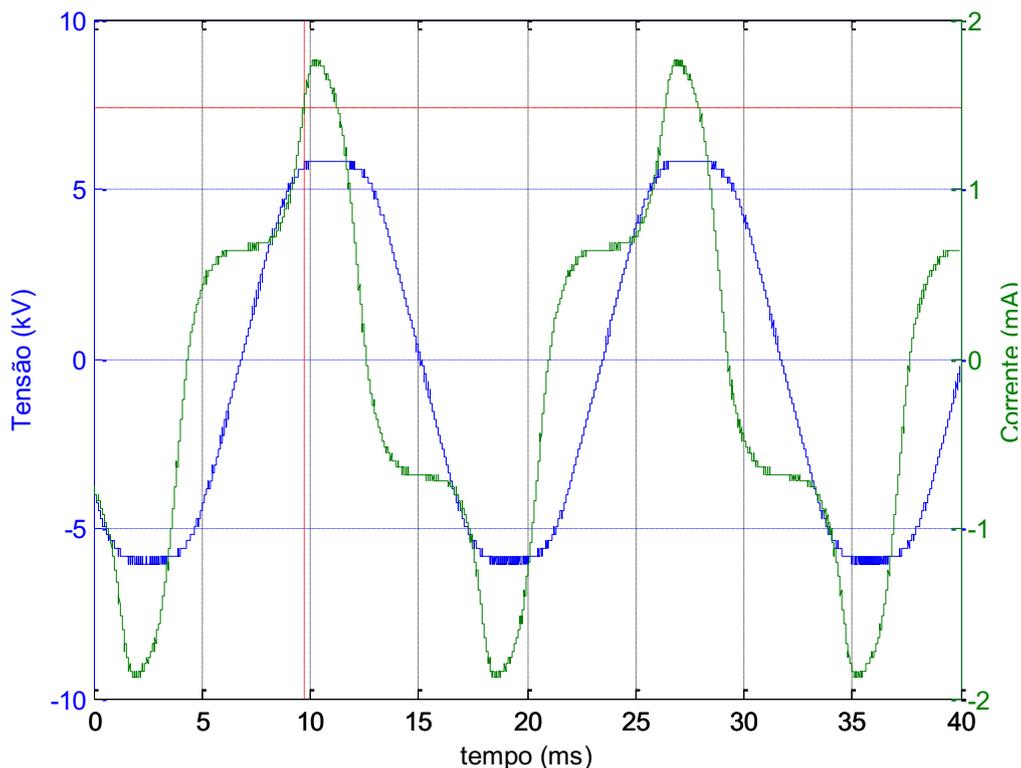
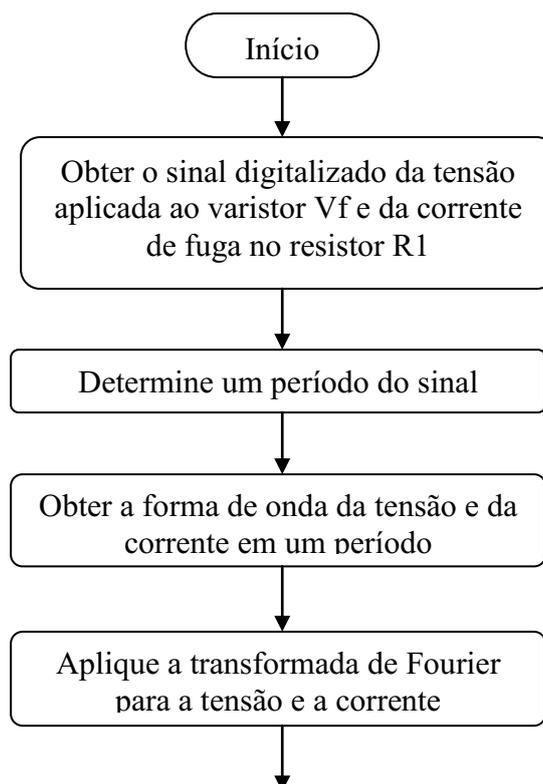


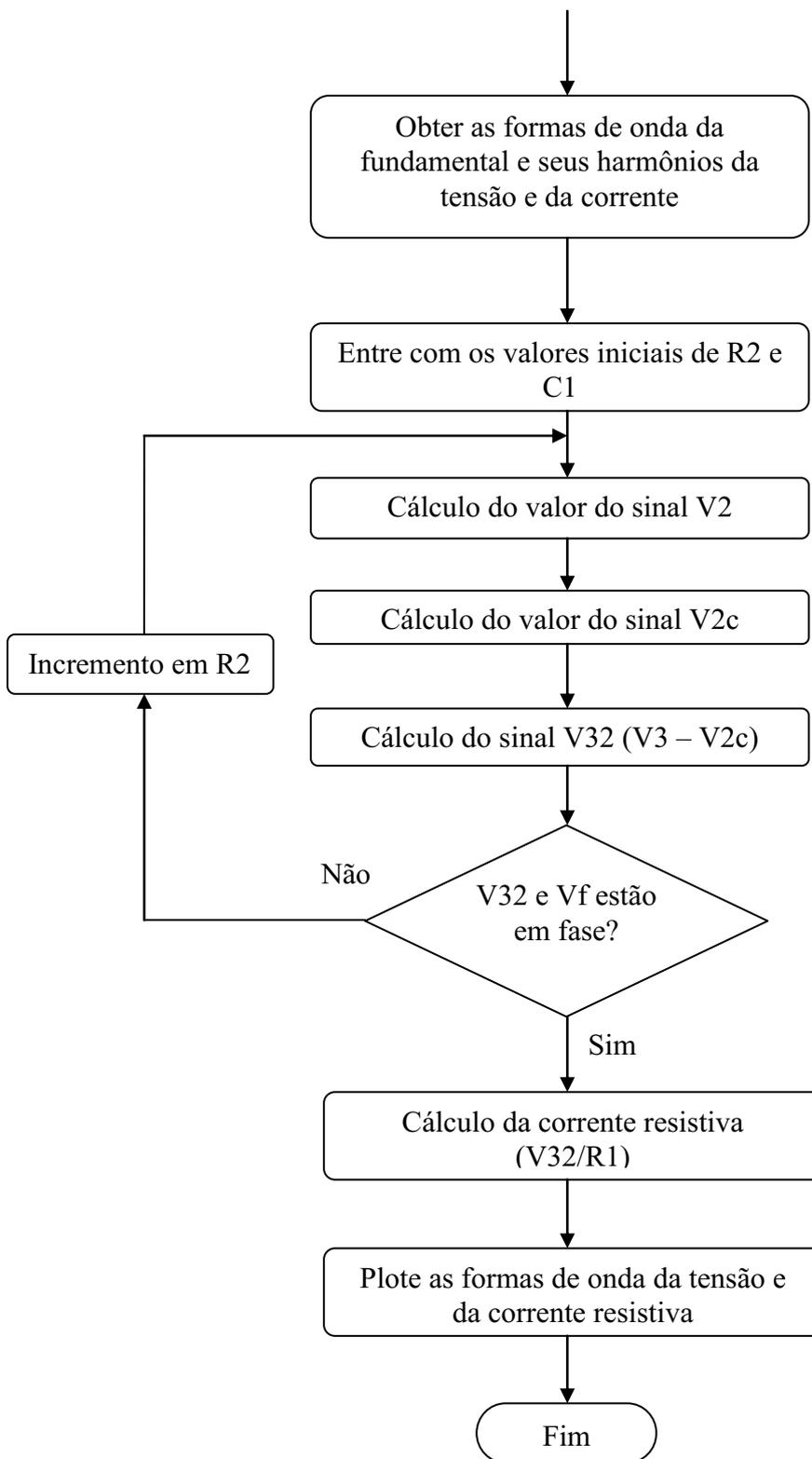
Figura 13 - Simulação do método da medição do pico da corrente resistiva.

4.2 Algoritmo e simulação do método da compensação com ponte virtual

De acordo com o método da compensação virtual foi formulado o algoritmo a seguir para a obtenção da corrente resistiva.

Algoritmo: Método da compensação com ponte virtual





A partir do algoritmo construiu-se uma rotina computacional no ambiente Matlab®. Como resultado, na Figura 14 são observadas as formas de onda da tensão e da corrente resistiva. O valor de pico da corrente resistiva é de 1,745 miliâmpères.

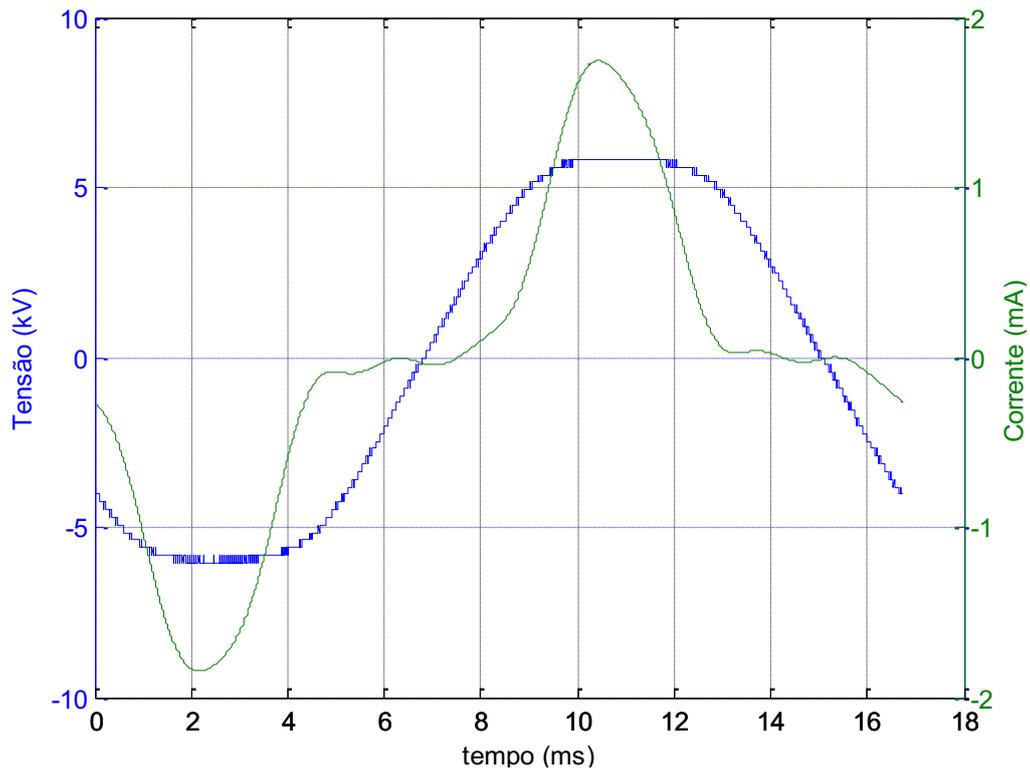
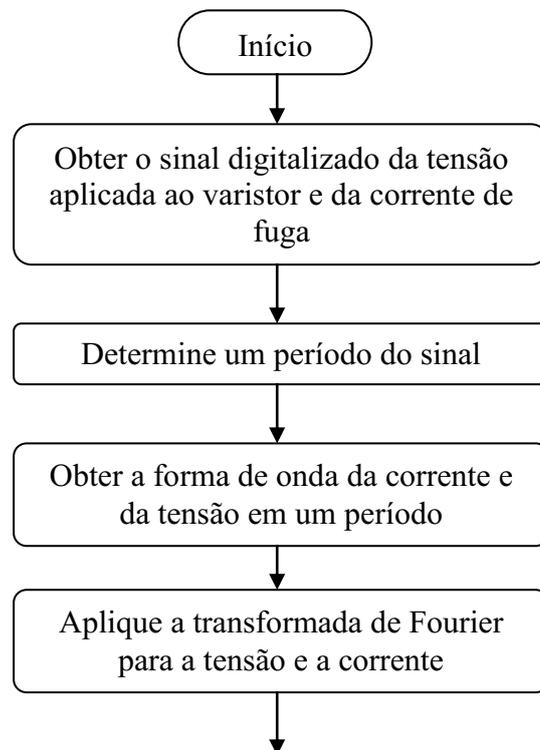


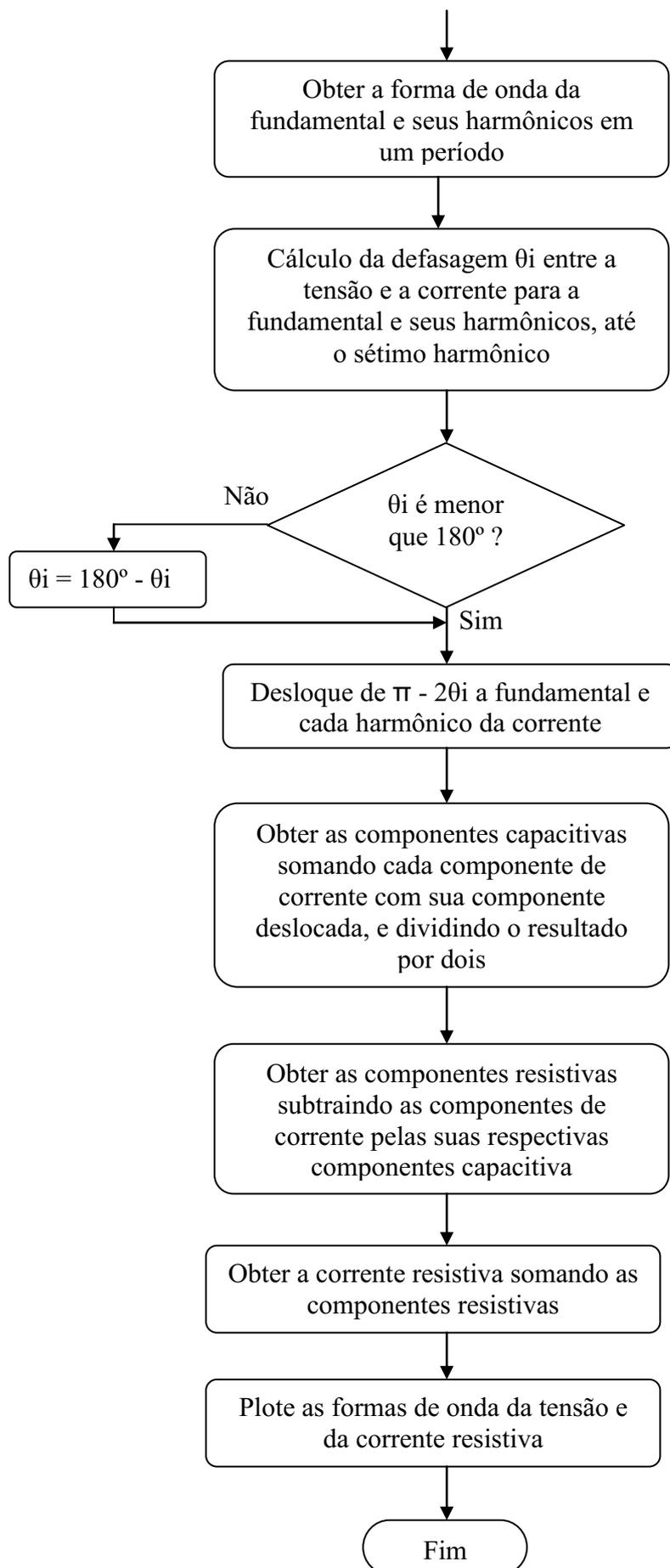
Figura 14 - Simulação do método da ponte virtual.

4.3 Algoritmo e simulação do método do deslocamento de fase

O algoritmo do método do deslocamento de fase com base na exposição do método observado na revisão bibliográfica foi desenvolvido obtendo o algoritmo a seguir.

Algoritmo: Método do deslocamento de fase





Com a formulação do algoritmo foi desenvolvido no ambiente Matlab® uma rotina computacional. São observadas na Figura 15 as formas de onda da tensão e da corrente resistiva para o método do deslocamento de fase. O valor de pico da corrente resistiva obtido é de 1,755 miliâmperes.

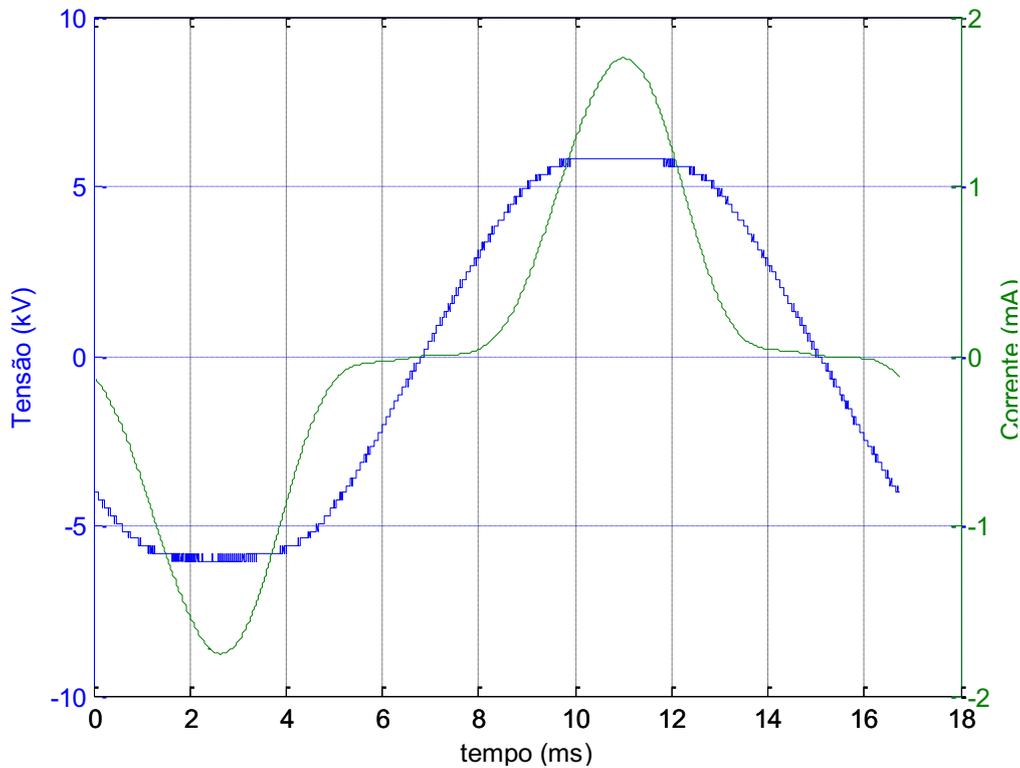
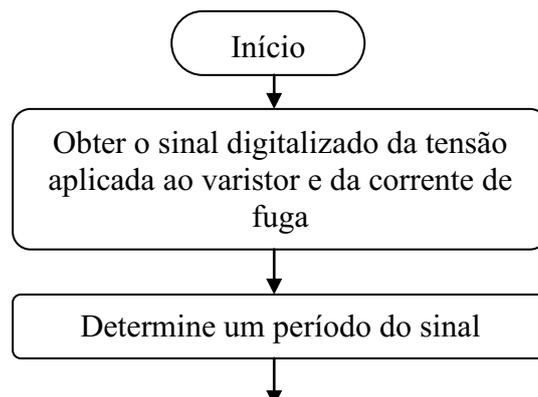


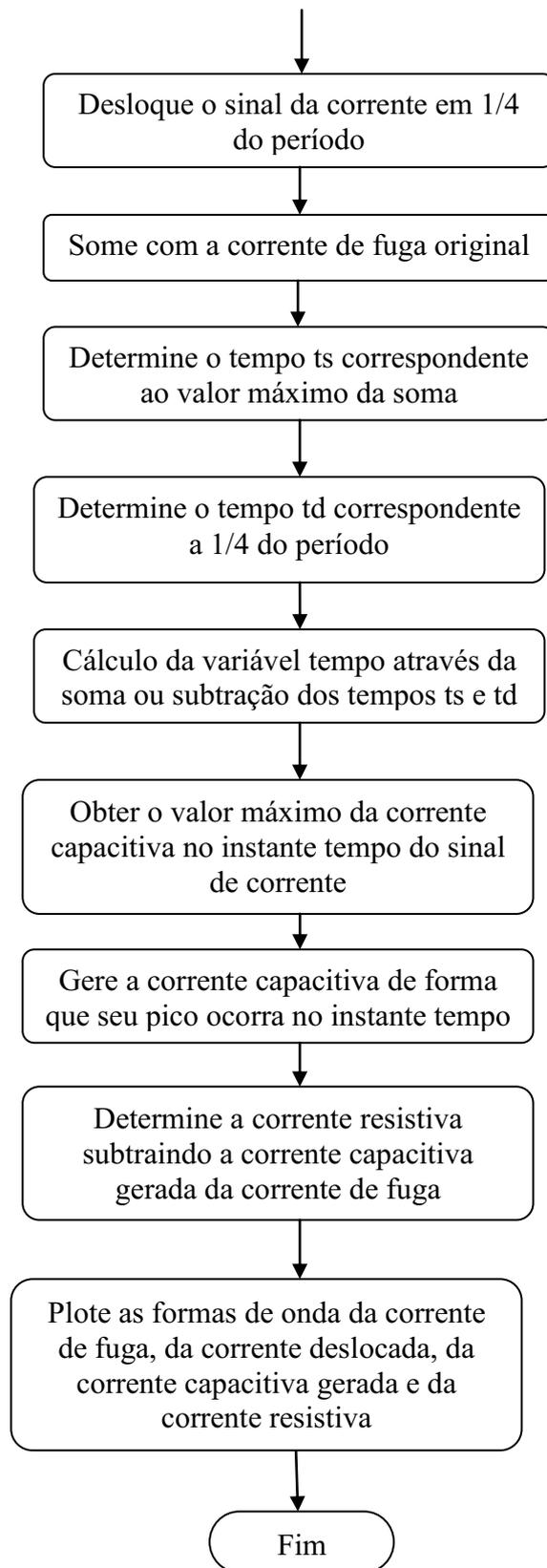
Figura 15 - Simulação do método do deslocamento de fase.

4.4 Algoritmo e simulação do método do deslocamento da corrente modificado (MSCM)

Para a formulação do algoritmo foi utilizado as informações obtidas na revisão bibliográfica. O algoritmo para a obtenção da corrente resistiva utilizando o método do deslocamento de fase modificado (MSCM) está descrito a seguir.

Algoritmo: Método do deslocamento da corrente modificado (MSCM)





Após a formulação do algoritmo foi desenvolvido uma rotina computacional no ambiente Matlab®. Os resultados são observados nas formas de onda da corrente na Figura 16, e nas formas de onda de tensão e corrente resistiva na Figura 17. O valor de pico da corrente resistiva obtido é de 1,846 miliâmpères.

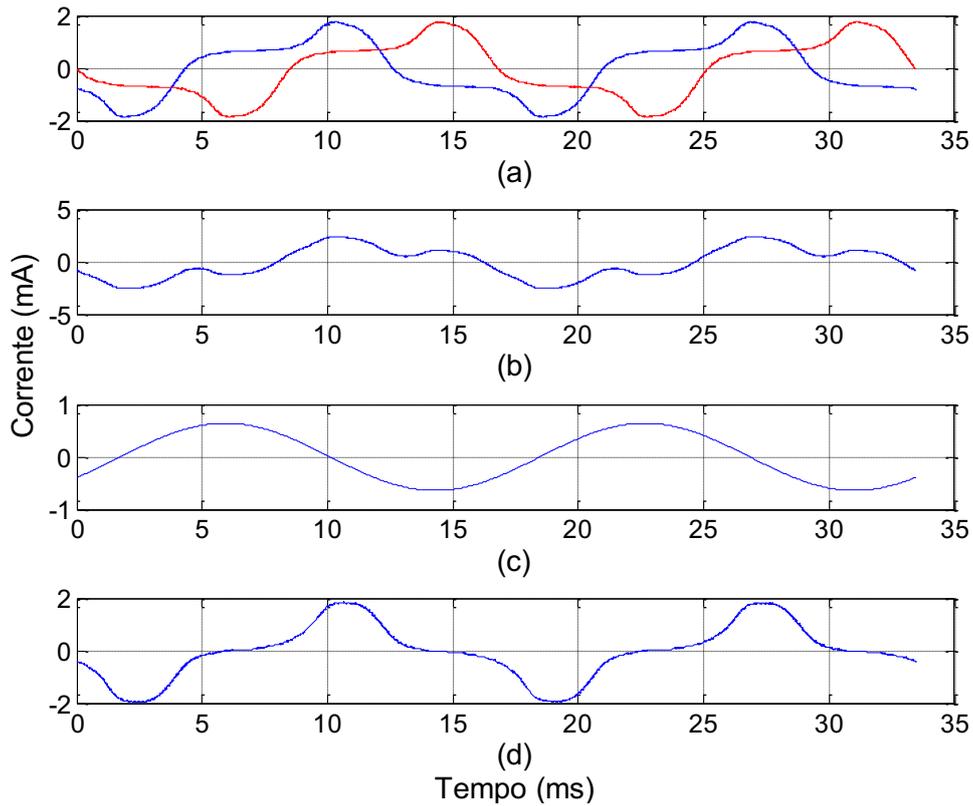


Figura 16 - 1ª Simulação do método do deslocamento da corrente modificado (MSCM) (a) Corrente total e corrente total deslocada; (b) Correntes somadas; (c) Corrente capacitiva gerada; (d) Corrente resistiva.

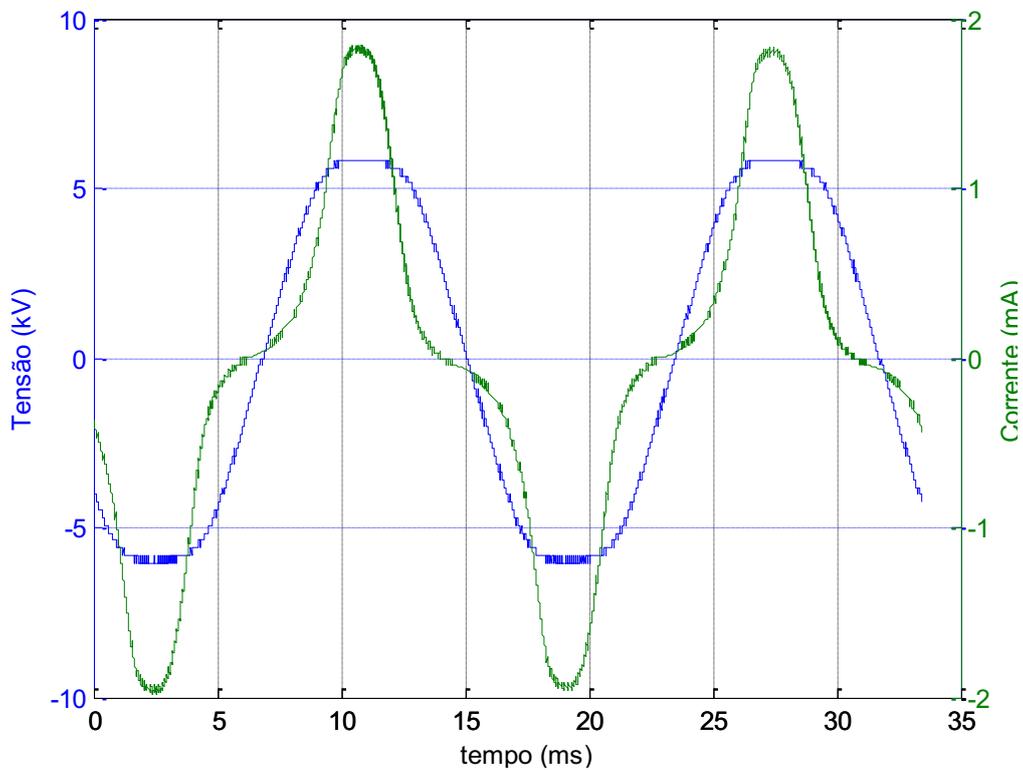
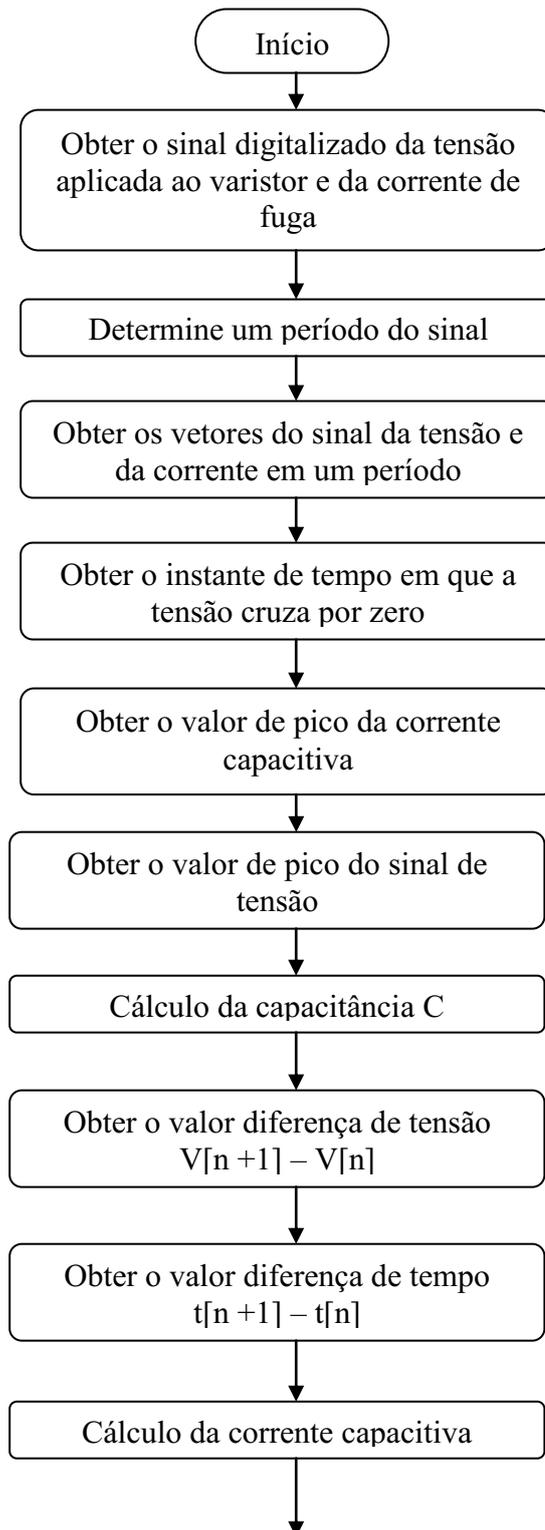


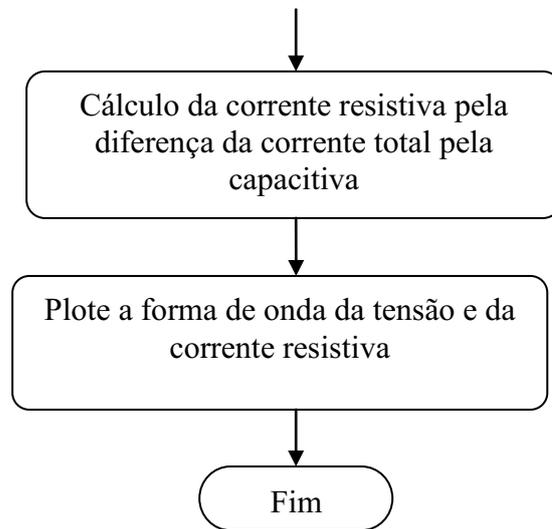
Figura 17 - 2ª Simulação do método do deslocamento da corrente modificado (MSCM).

4.5 Algoritmo e simulação do método da filtragem digital

De acordo com o método descrito na revisão bibliográfica, o algoritmo para a formulação do método foi desenvolvido, e é descrito a seguir.

Algoritmo: Método da filtragem digital





Com o algoritmo do método da filtragem digital formulado foi desenvolvido uma rotina computacional no ambiente Matlab®.

A princípio a rotina baseada no algoritmo obtido não funcionou, ao verificar os possíveis motivos da falha, foi percebido que o problema era a grande quantidade de pontos sucessivos repetidos no vetor de pontos da tensão, o que implica em vários valores de diferença de tensão nulos.

Para solucionar o problema foi aplicada a transformada de Fourier para estimar as componentes harmônicas de tensão e com isso obter um sinal suavizado possibilitando a detecção do ponto de derivada nula. A partir da estimação das componentes harmônicas o sinal de tensão foi reconstruído. O sinal reconstituído tornou-se o sinal de tensão aplicado no algoritmo. Observando a Figura 18, percebe-se que não houve perda de informação significativa, não havendo prejuízo na aplicação do método.

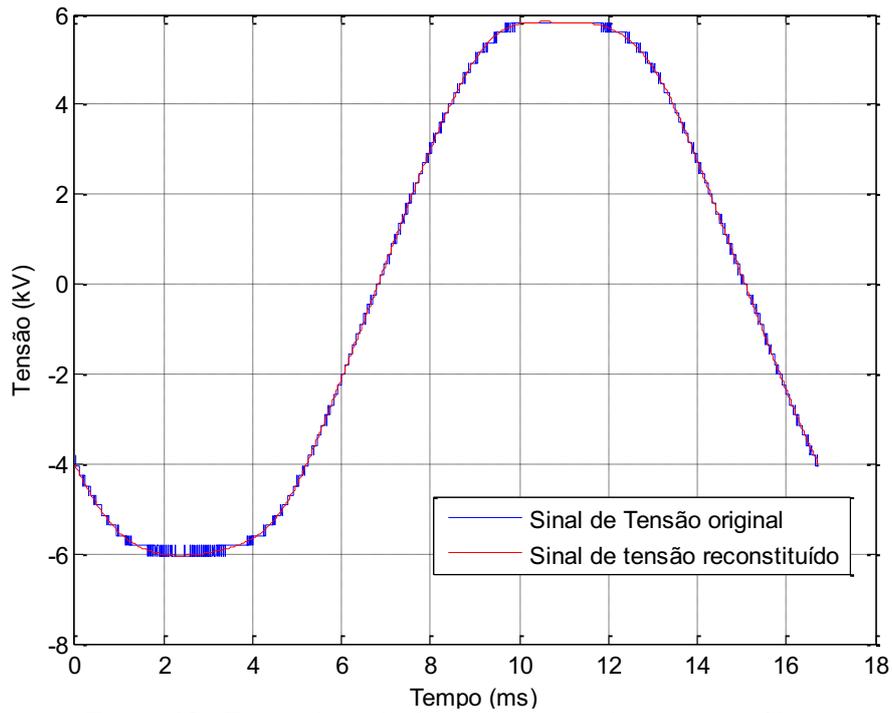


Figura 18 - Forma de onda da tensão original e reconstituída.

Aplicando no algoritmo o sinal de tensão reconstituído foram obtidas as formas de onda da tensão e da corrente resistiva observado na Figura 19. O valor de pico da corrente resistiva obtido é de 1,756 miliâmperes.

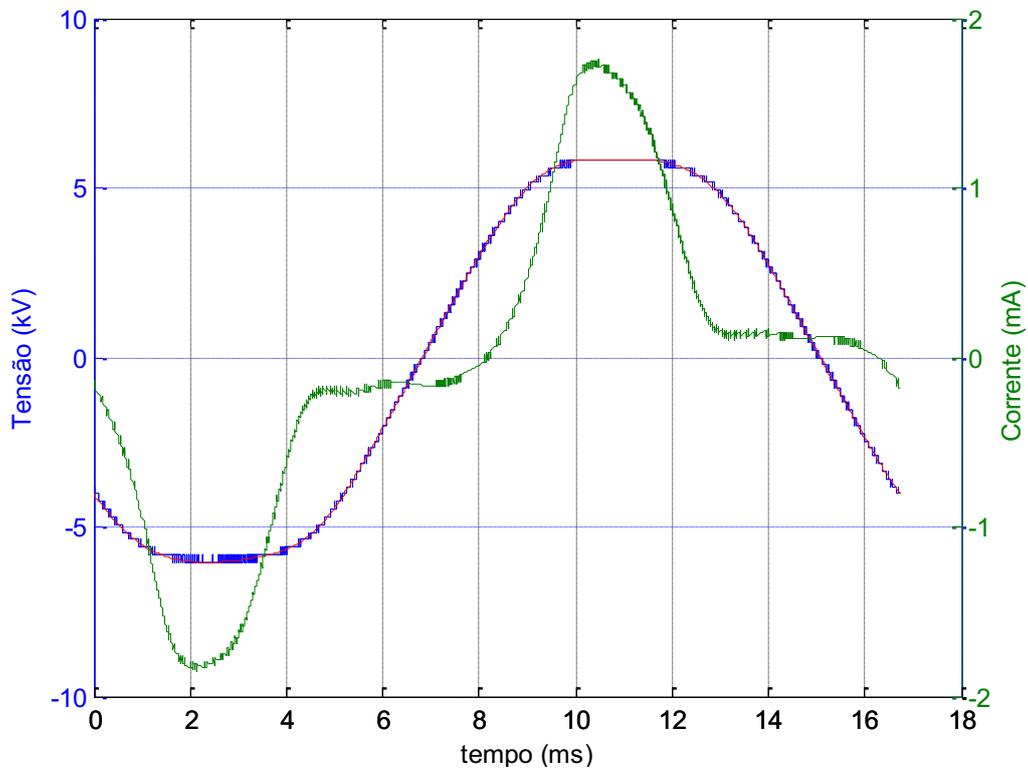


Figura 19 - Simulação do método da filtragem digital.

5. Análise dos resultados

5.1 Simulação do método da medição do pico da componente resistiva da corrente de fuga

O método necessita na sua aplicação de um ponto de derivada nula, que para um sinal senoidal, será o seu valor de pico. No entanto, os sinais da rede elétrica (obtido a partir de transformadores), por melhor que sejam, não geram senoides puras (sem distorção harmônica).

Como observado na Figura 11, a fonte de tensão utilizada não é senoidal, possuindo nas suas extremidades regiões de patamar. Devido ao algoritmo observar o valor máximo da tensão, o algoritmo encontrou o primeiro valor de máximo como sendo seu valor de pico, no entanto percebe-se que o valor máximo da tensão que equivale a 5,821 kV se mantém com esse valor por aproximadamente 2,26 milissegundos.

Dessa forma, a corrente de pico que apresentou um valor de 1,480 miliâmperes estaria na faixa entre 1,480 a 1,760 miliâmperes ou na faixa entre 1,760 a 0,720 miliâmperes. Sendo assim, percebe-se que o método seria mais eficaz se a tensão aplicada ao para-raios estivesse mais próxima de uma senoide pura.

A vantagem deste método é a sua fácil implementação, não necessitando de uma rotina computacional, sendo determinado apenas pela observação simultânea das formas de onda da tensão e da corrente na tela do osciloscópio.

Para quantificar o erro em relação ao valor de pico da corrente resistiva tomando como valor de referência, o valor experimental obtido utilizando o método da compensação diferencial capacitiva, é calculado o erro percentual observado na equação (25).

$$e\% = \frac{1,760 - 1,480}{1,760} \times 100 = 15,91 \% \quad (25)$$

5.2 Simulação do método da compensação com ponte virtual

No método da compensação com ponte virtual observa-se a vantagem de que o capacitor virtual utilizado no ramo RC é ideal ($tg \delta = 0$). Além disso, é considerada apenas a parte imaginária do ramo RC, ou seja, a compensação é totalmente capacitiva.

Observa-se na Figura 14 que a forma de onda da corrente não está totalmente em fase com a tensão, essa defasagem pode ser justificada pela maneira como é definido o momento em que a rotina identifica se os sinais estão em fase. Se for pelos seus valores de pico incorrerá no mesmo problema já discutido no método anteriormente abordado, se for pelo instante de tempo de cruzamento por zero, ocorrerão erros, pois o sinal da corrente resistiva não é senoidal, e têm a característica de ter vários pontos iguais a zero.

Outro problema é a escolha dos valores iniciais de R2 e C1, pois dependendo dos valores escolhidos pode ser que a rotina não convirja. A corrente capacitiva do ramo RC pode não ser suficiente para compensar a corrente capacitiva do para-raios.

O erro percentual calculado em relação ao valor de pico, tendo como método de referência, o método da compensação diferencial capacitiva, é observado na equação (26).

$$e\% = \frac{1,760 - 1,745}{1,760} \times 100 = 0,85 \% \quad (26)$$

5.3 Simulação do método do deslocamento de fase

O método do deslocamento de fase obteve um ótimo resultado, e mostrou-se mais confiável que os dois métodos discutidos anteriormente. Isso porque diferentemente dos métodos já discutidos que dependem da localização do ponto de derivada nula (método da medição do pico da componente resistiva da corrente de fuga), ou dependem da inserção de valores iniciais de resistência e capacitância (método da compensação com ponte virtual), o método do deslocamento de fase depende somente da aquisição das formas de onda da tensão e da corrente, independente se elas são senoides puras ou não, isso porque os cálculos realizados são baseados nas componentes harmônicas dos sinais de tensão e corrente, e do ângulo entre eles, e tendo em vista que as componentes harmônicas são senoidais e que o ângulo entre senoides é bem definido, não existe erro devido à forma de onda.

Observando a Figura 15 constata-se que a forma de onda da corrente resistiva é bem definida e que a corrente está totalmente em fase com a tensão. O erro percentual calculado em relação ao valor de pico, tendo como método de referência, o método da compensação diferencial capacitiva, é observado na equação (27).

$$e\% = \frac{1,760 - 1,755}{1,760} \times 100 = 0,28 \% \quad (27)$$

5.4 Simulação do método do deslocamento da corrente modificado (MSCM)

A principal vantagem do método do deslocamento da corrente modificado é a obtenção da componente resistiva, sem a necessidade do sinal da tensão aplicada ao varistor.

O erro na implementação desse método é devido principalmente por considerar que a componente capacitiva é senoidal, pois se a tensão é distorcida (em sistema reais de potência elas são), a componente capacitiva que depende da tensão será distorcida, e o método incorrerá em erros.

Observando a Figura 17 percebe-se que a forma de onda da corrente resistiva está assimétrica, possivelmente, pela consideração da corrente capacitiva como senoidal. Ainda na Figura 17, é perceptível a defasagem entre a corrente resistiva obtida e a tensão aplicada ao para-raios. Isso ocorre devido à componente capacitiva gerada ser diferente da componente capacitiva da corrente de fuga, uma vez que o sinal da tensão aplicada ao para-raios é distorcida, e conseqüentemente a componente capacitiva também será distorcida.

O erro percentual calculado em relação ao valor de pico, tendo como método de referência, o método da compensação diferencial capacitiva, é observado na equação (28).

$$e\% = \frac{1,760 - 1,846}{1,760} \times 100 = - 4,89 \% \quad (28)$$

5.5 Simulação do método da filtragem digital

Na aplicação do método da filtragem digital é necessário estimar o valor da capacitância C , e esta estimativa é obtida considerando a componente capacitiva da corrente de fuga total como senoidal. Como já discutido no método anterior isso incorrerá em erros, tendo em vista que os sinais de tensão dos sistemas elétricos de potência não são senoides puras.

Outro possível erro está no cálculo da estimativa da capacitância C , pois no cálculo é necessário obter o valor máximo da corrente capacitiva, e isso é feito pela determinação do valor da corrente no instante em que a tensão cruza por zero. Mas se a tensão for distorcida e houver mais de um ponto de cruzamento por zero, a determinação do valor de pico da corrente capacitiva estará errada.

Observando a Figura 19, percebe-se que há uma assimetria da forma de onda da corrente resistiva obtida. A fim de verificar se a assimetria era devido ao erro na determinação da capacitância C , a mesma foi incrementada gradualmente e observado o comportamento da corrente resistiva, e foi percebida uma melhora significativa na assimetria da forma de onda, o que leva a crer que o principal causador da assimetria é o erro na determinação da capacitância C .

Outro problema já discutido é se o sinal de tensão tiver muitos valores consecutivos repetidos, sendo necessário a implementação de alguma técnica para obter a forma de onda desejada, sem perda de informação, mas sem repetições sucessivas de valores. O erro percentual calculado em relação ao valor de pico, tendo como método de referência, o método da compensação diferencial capacitiva, é observado na equação (29).

$$e\% = \frac{1,760 - 1,756}{1,760} \times 100 = 0,23 \% \quad (29)$$

6. Conclusões

Neste trabalho foi realizado um estudo comparando cinco métodos utilizados para decomposição da corrente de fuga em para-raios de Óxido de Zinco (ZnO). Foram elaborados algoritmos para simulação no ambiente Matlab® com base em artigos científicos publicados, uma dissertação de Mestrado e uma tese de Doutorado.

Durante pesquisas sobre os métodos utilizados foi possível observar que a principal dificuldade encontrada é a necessidade da maioria dos métodos da obtenção do sinal de tensão. Essa dificuldade é devido ao elevado custo de implantação do sistema de medição de alta tensão com a única finalidade de monitoramento em para-raios. Uma medida barata é a utilização de sensores próximos ao para-raios, no entanto, devido aos para-raios estarem próximos não se pode garantir que o sinal de tensão monitorado é da fase a, b ou c, tornando o monitoramento de tensão pouco confiável.

Analisando os métodos simulados deve se dá um destaque especial para o método do deslocamento da corrente modificado (MSCM), pois dos métodos pesquisados é o único que não necessita do sinal de tensão, no entanto a suposição de uma componente capacitiva senoidal pode implicar em erros consideráveis.

O método da medição do pico da corrente resistiva mostra-se bastante simples e de fácil implementação, podendo ser implementado sem a necessidade de uma rotina computacional, no entanto o uso do método em sinais de tensão com elevado índice de distorção harmônica torna o resultado pouco confiável.

O método da compensação com ponte virtual fornece bons resultados, mas a necessidade da entrada de valores iniciais de resistência e capacitância torna a rotina computacional muito dependente, diminuindo o automatismo (velocidade de resposta) muito importante no processo de monitoramento, isso porque dependendo dos valores iniciais escolhidos pode ser que a rotina não convirja. Outro problema deste método é a forma de como identificar quando a corrente resistiva está em fase com a tensão.

O método da filtragem digital apresenta a necessidade da estimativa da capacitância do para-raios como sua principal desvantagem, pois para a implementação do método é considerado que a tensão aplicada ao para-raio é senoidal, porém é um método de fácil implementação.

O método do deslocamento de fase apresentou ótimos resultados, tendo como principal vantagem o comportamento indiferente quanto à forma de onda da tensão e corrente, diferente dos outros métodos que o resultado está relacionado com o nível de

harmônico presente no sinal de tensão, quanto maior a quantidade de harmônicos maior será o erro e vice-versa.

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e proporcionou uma visão mais crítica dos métodos de decomposição da corrente de fuga em para-raios de Óxido de Zinco (ZnO).

Apesar dos métodos terem surgidos desde a década de 80 percebe-se que o método otimizado ainda não foi encontrado, o que mostra que muito ainda tem que ser estudado e aperfeiçoado. Além disso, este trabalho de conclusão de curso possibilitou uma aproximação maior com o ambiente de simulação, mais especificamente do ambiente Matlab®.

Percebeu-se ao longo das implementações que um método descrito textualmente ou matematicamente apresenta uma série de dificuldades para sua implementação como um algoritmo computacional, mas esta dificuldade proporciona um aprendizado muito maior do que uma simples leitura do método.

7. Referências Bibliográficas

Abdul-Malek, Z. and Aulia, N. *A New Method to Extract the Resistive Component of the Metal Oxide Surge Arrester Leakage Current*. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia.

Heinrich, Christian and Hinrichsen, Volker. *Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks - Comparison of Existing and Newly Developed Procedures*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, N^o 1, January 2001.

Hinrichsen, Volker. *Monitoring of high voltage metal oxide surge arrester*. VI Jornadas Internacionales de Aislamiento Electrico, Bilbao, 22 –23 October 1997 paper 6.4.

Karawita, Chandana, Raghuvver, M.R.. *On site MOSA condition assessment – A new Approach*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, N0.3, July 2006.

Lira, José Gutemberg A. *Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de pára-raios de óxido de zinco*. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Campina Grande, Tese doutorado, 2007.

Lira, José Gutemberg A., Freire, Raimundo C. S., Costa, Edson Guedes, Macedo, Euler C.T., Luciano, Benedito A. *Sistema de avaliação espectral para sistemas elétricos baseado em microcontrolador*. 6^o Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, Uruguai, 2005.

Lundquist, J. Stenstrom, L. Schei, A. Hansen, B. *New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp. 1811-1822, November,1990.

Meira, U. R. Nowacki, K. Deep, G. S. *Measurement of Resistive Leakage Current of Metal-Oxide Surge Arresters*. Grécia. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 83, 64-07, 1983.

Shirakawa, S., Goto, K., Sakai, M., Endo, F., Kitajima, H., Konayashi, S., Kurita, K., Sakai, M. *Maintenance of Surge Arrrester by a portable arrester leakage current detector*. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 3, N^o 3, pp. 998-1003, July 1988.

Souza, Ronimack Trajano. *Medição e análise harmônica da corrente de fuga resistiva em varistores de ZnO*. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Campina Grande, Dissertação Mestrado, 2004.

Spellman, C. A., Haddad, A. *A Technique for On-Line Monitoring of ZnO Surge Arresters*. 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Canada, August, 1997.