

Avaliação da Impedância Harmônica de uma Malha de Aterramento Submetida a Correntes Impulsivas

Felipe J. L. de Araújo
Edson G. da Costa
Helder Alves Pereira
Marconni F. B. R. Gonçalves
João Marcelo Costa
Genoilton João de Carvalho Almeida
Dept. Engenharia Elétrica – Coordenação de Pós-Graduação
Univ. Fed. de Campina Grande - UFCG
Campina Grande, Brasil
felipe.araujo@ee.ufcg.edu.br

Resumo— Neste trabalho foi realizada uma avaliação experimental da resposta transitória de uma malha de aterramento de subestação de distribuição submetida a correntes impulsivas. Foram analisadas a influência na impedância harmônica, variando-se a intensidade da corrente injetada, como também, do tempo de frente do sinal de corrente impulsivo injetado na malha de aterramento ensaiada. A partir dos ensaios realizados, observou-se que a impedância harmônica não tem variação significativa quando se manteve a forma de onda do sinal de corrente impulsivo aplicado na malha de aterramento ensaiada e variou-se a sua intensidade. Os resultados mostraram que o módulo da impedância harmônica se inicia em torno do valor da resistência em baixa frequência e tem seu máximo em aproximadamente 1 MHz. Para todos os casos estudados, a fase da impedância harmônica apresentou comportamento predominantemente indutivo na maior parte do espectro de frequência estudado.

Palavras Chaves—Impulso de corrente, impedância harmônica, malha de aterramento.

I. INTRODUÇÃO

As concessionárias de energia elétrica são responsáveis pela compra de grandes quantidades de energia elétrica das empresas geradoras e pela adequação dos níveis de tensão da energia recebida das empresas transmissoras com o objetivo de transportá-la a grandes e pequenas cidades. Ainda é de responsabilidade das concessionárias de energia elétrica, manter de forma contínua o fornecimento da energia elétrica a seus consumidores. Dentro deste contexto, os sistemas de aterramento têm um papel de fundamental importância, especialmente quando se leva em conta a segurança das pessoas e equipamentos ligados às linhas de distribuição e de transmissão de energia elétrica.

Aterramento elétrico é, essencialmente, uma ligação proposital, através de condutor elétrico, entre um sistema físico e a terra. O principal objetivo desta ligação é fornecer um caminho de baixa impedância para correntes oriundas de descargas atmosféricas, de curtos-circuitos e de cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

A faixa de frequência que uma malha de aterramento opera é dividida em frequência industrial (baixa frequência) e os transitórios eletromagnéticos devido a correntes impulsivas (alta frequência) [1]. Frequência industrial é a faixa de valores de frequência utilizados em sistemas de elétricos de potência. Na maioria dos projetos, o dimensionamento da malha de aterramento é realizado para atender solicitações de baixa frequência, como as correntes de curto-circuito [2]. No entanto, o comportamento dos eletrodos de aterramento para altas frequências é distinto em relação à resposta desses eletrodos para baixas frequências [1]. Esta diferença de comportamento deve-se, principalmente, pela dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, o fenômeno da ionização do solo e a resposta do aterramento frente a correntes impulsivas [1], [2] e [3].

Os parâmetros que caracterizam sistemas aterramento submetido a correntes impulsivas são sua impedância impulsiva, impedância transitória, coeficiente impulsivo, que são relacionados à resposta transitória no domínio do tempo e impedância harmônica, que representa a resposta transitória de um sistema de aterramento no domínio da frequência [2]. Neste trabalho, optou-se por usar a impedância harmônica de aterramento, pelo fato dessa grandeza expressar o comportamento do sistema de aterramento ao longo do espectro de frequência.

No domínio da frequência, considerando ondas impulsivas típicas de correntes de descargas atmosféricas e correntes de manobra, normalmente, o comportamento do sistema de aterramento é representado através da impedância harmônica de aterramento $Z(w)$ que é a razão entre a elevação de potencial ($V(w)$) estabelecida no eletrodo (referenciada ao infinito) e a corrente aplicada ao aterramento para cada frequência específica, como mostrado na Equação 1 [3].

$$Z(w) = \frac{V(w)}{I(w)} \quad (1)$$

O fenômeno da descarga atmosférica, de característica impulsiva, trazem prejuízos sobre os sistemas de transmissão e

istribuição de energia elétrica, como danos aos equipamentos que estão ligados à rede elétrica, prejudicando a qualidade do fornecimento de energia, podendo até mesmo interrompê-los. Um método preventivo, que poderia minimizar as interrupções provocadas por descargas atmosféricas, é fornecer um caminho de baixa impedância para as descargas atmosféricas que incidem em linhas de transmissão e distribuição, através de uma malha de aterramento devidamente elaborada. O conhecimento da resposta de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas possibilita o desenvolvimento de sistemas e equipamentos que auxiliam na proteção do sistema elétrico, diminuindo os efeitos das descargas atmosféricas.

Neste trabalho é apresentada uma avaliação da impedância harmônica (módulo e fase) de uma malha de aterramento submetida a sinais de correntes impulsivos, em relação à amplitude da corrente injetada no solo, como também ao tempo de frente da onda impulsiva.

II. MATERIAL E MÉTODOS

A. Material

Com o objetivo de analisar os transitórios eletromagnéticos de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas, foi construída uma malha de aterramento nas proximidades do Laboratório de Alta Tensão que fica localizada na cidade de Campina Grande– PB.

A malha de aterramento ensaiada é constituída de 18 hastes verticais de aço revestidas por cobre, com 3 m de comprimento e 12,2 mm de diâmetro, interligadas por cabos e cobre nu com 50 mm² de seção transversal, através de soldas exotérmicas.

B. Métodos

Para obter os resultados, aplicou-se na malha de aterramento ensaiada sinais de correntes impulsivos produzidos a partir de um gerador de impulsos de corrente elétrica de 80 kJ/100 kV. O circuito elétrico do gerador de impulso de corrente esta ilustrado na Figura 1.

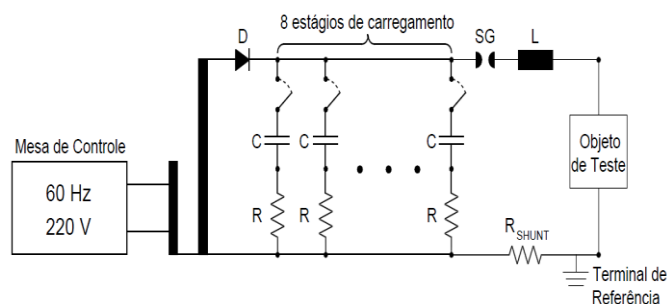


Figura 1. Circuito elétrico do gerador de impulso de corrente

Os sinais de tensão e corrente foram adquiridos utilizando-se dois osciloscópio digitais com taxa de amostragem de 2 GS/s. O circuito elétrico utilizado nos ensaios experimentais esta ilustrado na Figura 2.

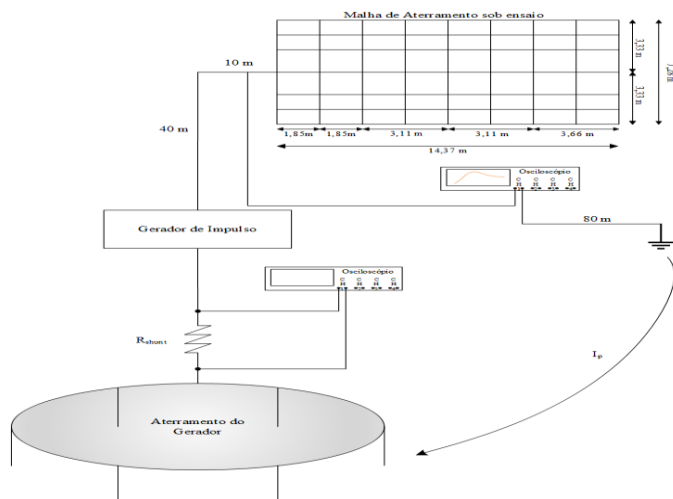


Figura 2. Circuito elétrico utilizado nos ensaios experimentais

A saída do gerador de impulso está conectada à malha de aterramento por meio de um cabo coaxial, por onde circula a corrente impulsiva I_p . O ângulo entre os condutores do gerador de impulso e a malha de aterramento ensaiada é de 90°, com isso, tensões induzidas devido à variação de fluxo magnético são reduzidas. Para evitar reflexões sucessivas entre a malha de aterramento ensaiada e o condutor do gerador de impulso, o comprimento do mesmo é de 50 m.

O sinal da tensão foi adquirido diretamente na haste de injeção de corrente da malha de aterramento ensaiada. O sinal de corrente foi obtido utilizando-se o método do resistor *shunt*, em que se conhecendo o valor desse resistor, calcula-se a corrente aplicada na malha de aterramento a partir da tensão nos terminais deste resistor. Um resistor *shunt* de filme de carbono com resistência de 10,54 mΩ foi utilizado nos experimentos. A impedância harmônica ($Z(w)$) foi obtida pela razão entre a elevação de potencial ($V(w)$) desenvolvida no eletrodo (referenciada ao infinito) e a corrente aplicada a malha de aterramento para cada frequência específica, conforme a Equação 1.

Foram utilizadas três configurações do gerador de impulso, resultando em três sinais de correntes impulsivas no domínio do tempo. Para cada sinal de corrente impulsivo injetado na malha de aterramento ensaiada, é estabelecida uma tensão correspondente no eletrodo de injeção de corrente. A transformada rápida de Fourier foi aplicada aos sinais de tensão e corrente (domínio do tempo) no software MATLAB, com isso, foram obtidos os vetores de tensão e corrente no domínio da frequência. A impedância harmônica ($Z(w)$) foi obtida pela razão entre a elevação de potencial ($V(w)$) desenvolvida no eletrodo (referenciada ao infinito) e a corrente aplicada a malha de aterramento para cada frequência específica, conforme a Equação 1.

Os resultados contemplam a impedância harmônica de aterramento (módulo e fase) para três intensidades de corrente distintas, para cada forma de onda adquirida pelas configurações do gerador de impulso.

III. RESULTADOS

Os ensaios foram realizados a uma temperatura média de 31°C e umidade relativa do ar de 42%. A resistência em baixa frequência, medida usando o Método da queda de potencial foi de $3,5\ \Omega$.

A. Configuração 1 do gerador de impulso

A Figura 3 ilustra os três sinais de correntes impulsivas injetadas na malha de aterramento ensaiada. A configuração do gerador, para esses sinais é:

- 3 estágios;
- Resistor = $17,5\ \Omega$;
- Indutor = $5,7\ \mu\text{H}$;
- Capacitor = $2\ \mu\text{F}$.

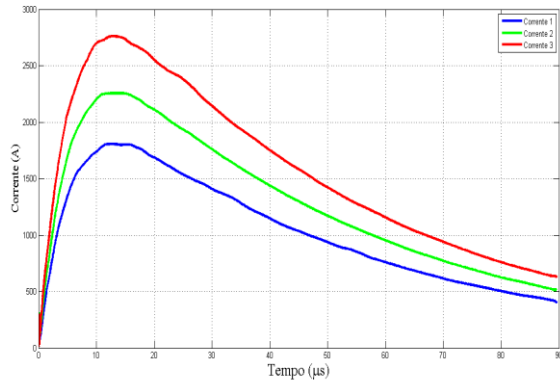


Figura 3. Correntes injetadas na malha de aterramento ensaiada.

A tabela 1 apresenta os tempos de frente e cauda das ondas de correntes injetadas na malha de aterramento ensaiada.

Tabela 1 – Tempo de frente e cauda das corrente injetadas.

Corrente injetada	Tempo de frente [μs]	Tempo de cauda [μs]	I_p [kA]
Corrente 1	12,56	51,94	1,84
Corrente 2	12,64	51,56	2,27
Corrente 3	12,60	50,63	2,81

A Figura 4 ilustra a elevação de potencial estabelecida no eletrodo de injeção de corrente em relação ao terra remoto, para cada sinal de corrente impulsivo injetado na malha de aterramento ensaiada.

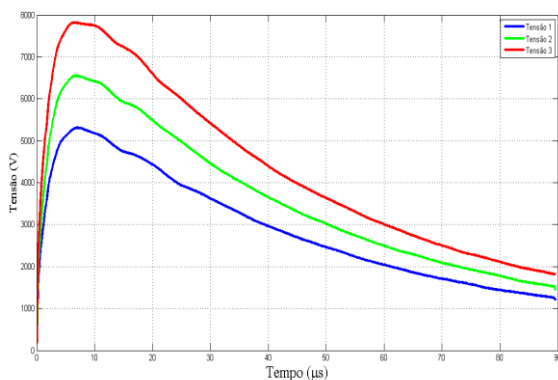


Figura 4. Elevação de potencial em relação ao terra remoto.

A Tabela 2 apresenta os tempos de frente e meia cauda dos sinais de tensão estabelecido no eletrodo de injeção de corrente em relação ao terra remoto.

Tabela 2 - Tempo de frente e meia cauda das tensões desenvolvidas no eletrodo.

Tensão estabelecida	Tempo de frente [μs]	Tempo de meia cauda [μs]	V_p [kV]
Tensão 1	6,72	45,03	5,37
Tensão 2	6,24	44,33	6,61
Tensão 3	6,04	44,33	7,85

Nas Figuras 5 e 6 estão ilustrados os módulos e fases das impedâncias harmônicas correspondentes a cada nível de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

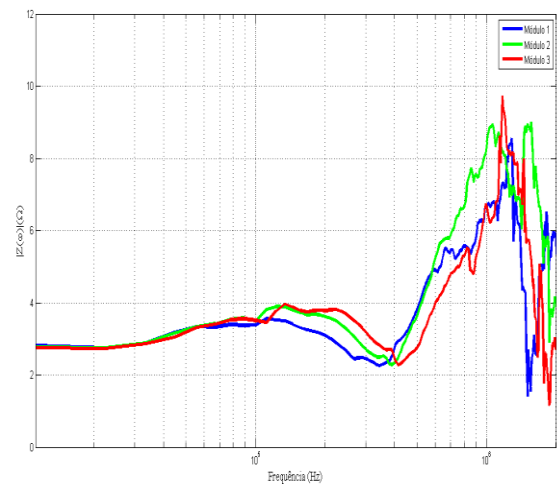


Figura 5. Módulos das impedâncias harmônica em relação a cada nível de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

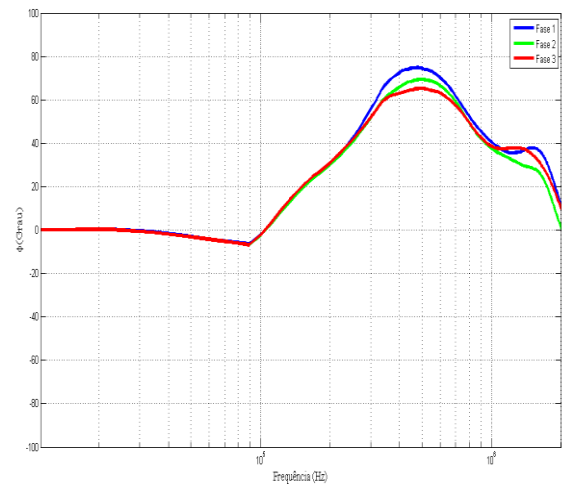


Figura 6. Fases das impedâncias harmônica em relação a cada nível de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

B. CONFIGURAÇÃO 2 DO GERADOR DE IMPULSO

A Figura 7 ilustra os três sinais de corrente impulsivo injetados na malha de aterramento ensaiada. A configuração do gerador, para esses sinais é:

- 1 estágio;
- Resistor = 5 Ω ;
- Indutor = 5,7 μH ;
- Capacitor = 2 μF .

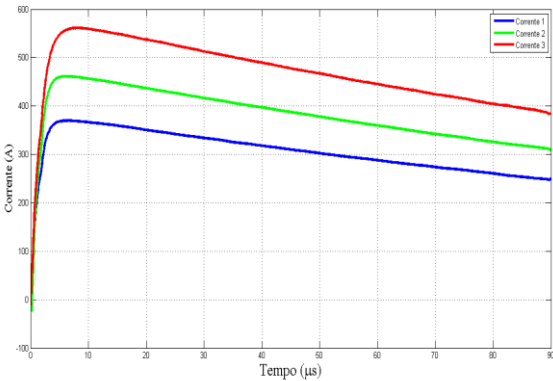


Figura 7. Correntes injetadas na malha de aterramento ensaiada.

A tabela 3 apresenta os tempos de frente e cauda das ondas de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

Tabela 3 – Tempo de frente e cauda das corrente injetadas.

Corrente injetada	Tempo de frente [μs]	Tempo de cauda [μs]	I_p [kA]
Corrente 1	12,56	51,94	1,84
Corrente 2	12,64	51,56	2,27
Corrente 3	12,60	50,63	2,81

A Figura 8 ilustra a elevação de potencial estabelecida no eletrodo de injeção de corrente em relação ao terra remoto, para cada sinal de corrente impulsivo injetado na malha de aterramento ensaiada.

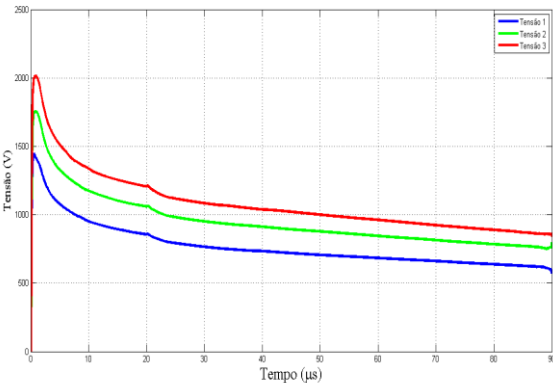


Figura 8. Elevação de potencial em relação ao terra remoto.

A tabela 4 apresenta os tempos de frente e meia cauda dos sinais de tensão estabelecidos no eletrodo de injeção de corrente em relação ao terra remoto.

Tabela 4 - Tempo de frente e meia cauda das tensões desenvolvidas no eletrodo.

Tensão estabelecida	Tempo de frente (μs)	Tempo de meia cauda (μs)	V_p (kV)
Tensão 1	0,80	22,99	1,73
Tensão 2	0,84	10,78	2,17
Tensão 3	0,84	9,69	2,48

Nas Figuras 9 e 10 estão ilustrados os módulos e fases das impedâncias harmônicas correspondentes a cada nível de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

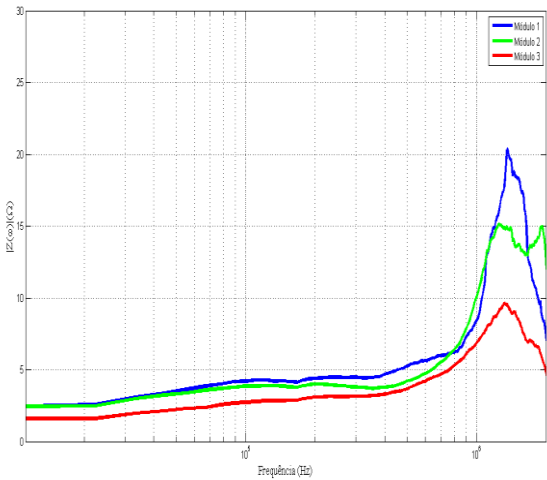


Figura 9. Módulos das impedâncias harmônica em relação a cada nível de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

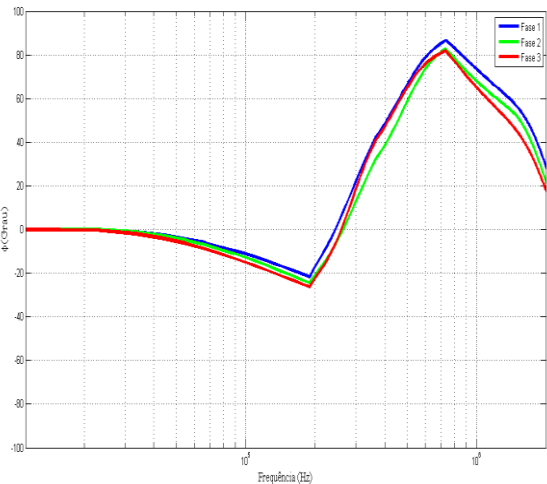


Figura 10. Fases das impedâncias harmônica em relação a cada nível de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

C. CONFIGURAÇÃO 3 DO GERADOR DE IMPULSO

A Figura 11 ilustra os três sinais de correntes impulsivas injetadas na malha de aterramento ensaiada. A configuração do gerador para esses sinais é:

- 1 estágio;
- Resistor = 100 Ω;
- Indutor = 5,7 μH;
- Capacitor = 2 μF.

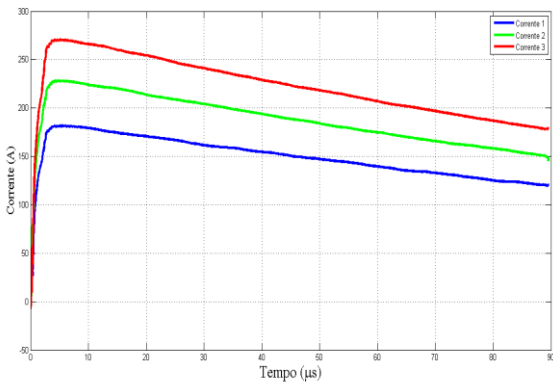


Figura 11. Correntes injetadas na malha de aterramento ensaiada. A tabela 5 apresenta os tempos de frente e cauda dos sinais de correntes impulsivas injetadas na malha de aterramento ensaiada.

Tabela 5 – Tempo de frente e cauda das corrente injetadas.

Corrente injetada	Tempo de frente (μs)	Tempo de cauda (μs)	I _p (kA)
Corrente 1	2,84	146,75	0,18
Corrente 2	2,89	146,15	0,23
Corrente 3	2,89	146,15	0,27

A Figura 12 ilustra a elevação de potencial estabelecida no eletrodo de injeção de corrente em relação ao terra remoto, para cada sinal de corrente impulsivo injetado na malha de aterramento ensaiada.

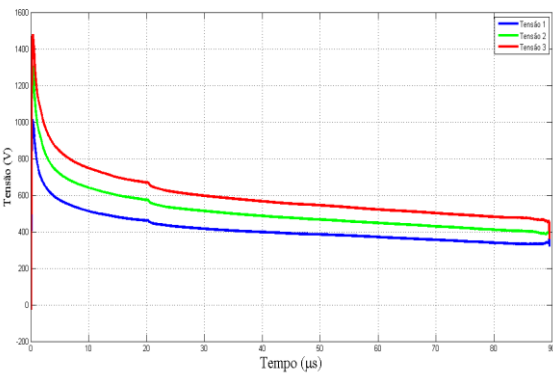


Figura 12. Elevação e potencial em relação ao terra remoto. A tabela 8 apresenta os tempos de frente e meia cauda das ondas de tensão estabelecida no eletrodo de injeção de corrente em relação ao terra remoto.

Tabela 8 - Tempo de frente e meia cauda das tensões desenvolvidas no eletrodo.

Tensão estabelecida	Tempo de frente (μs)	Tempo de meia cauda (μs)	V _p (kV)
Tensão 1	0,84	3,80	1,08
Tensão 2	2,20	3,40	1,37
Tensão 3	2,28	3,60	1,60

Nas Figuras 13 e 14 estão ilustrados os módulos e fases das impedâncias harmônicas correspondentes a cada nível de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

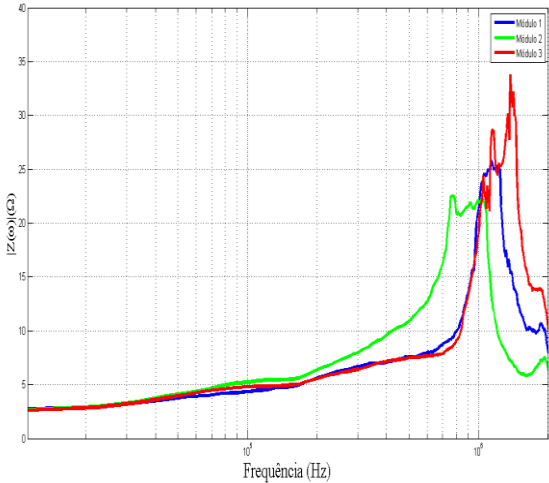


Figura 13. Módulos das impedâncias harmônica em relação a cada nível de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

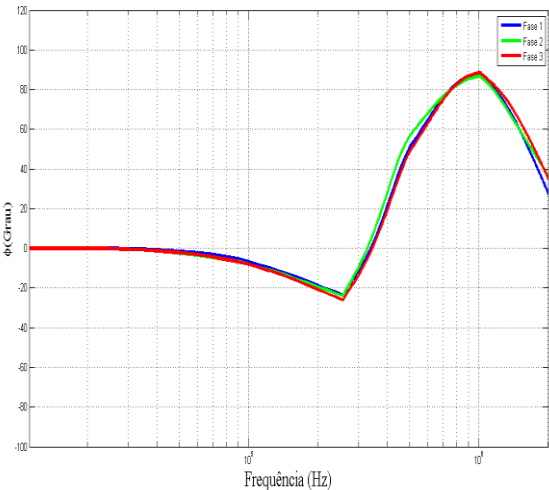


Figura 14. Fases das impedâncias harmônica em relação a cada nível de corrente injetada na malha de aterramento ensaiada.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os resultados obtidos na Configuração 1, observa-se que para frequências menores que 400 kHz, o módulo da impedância harmônica é aproximadamente igual à

resistência em baixas frequências, em concordância com [4] e [5]. Acima de 400 kHz, percebe-se que o módulo da impedância passa a ter o seu valor aumentado, atingindo seu máximo em aproximadamente 1 MHz, em concordância com os resultados obtidos por [4] e [5]. Também é observado que o efeito indutivo da malha inicia-se em aproximadamente 100 kHz.

Analisando os resultados obtidos na Configuração 2, observa-se que para frequências menores que 20 kHz, o módulo da impedância harmônica é aproximadamente igual à resistência em baixas frequências, em concordância com [4]. Acima de 20 kHz, percebe-se que o módulo da impedância passa a ter o seu valor aumentado, atingindo seu máximo em aproximadamente 1 MHz, em concordância com o resultados obtidos por [4] e [5]. Também é observado que o efeito capacitivo da malha é predominante entre as frequências de 40 kHz e 300 kHz. Esse fato pode ser explicado devido que para frequências elevadas, a corrente de deslocamento é predominante em relação a corrente de condução. No entanto, para frequências acima de 300 kHz, o efeito indutivo da malha de aterramento se torna predominante, e a fase aumenta com a frequência, atingindo seu máximo em aproximadamente 1 MHz.

Analisando os resultados obtidos na Configuração 3, observa-se que para frequências menores que 20 kHz, o módulo da impedância harmônica é aproximadamente igual à resistência em baixas frequências, em concordância com [4]. Acima de 20 kHz, percebe-se que o módulo da impedância passa a ter o seu valor aumentado, atingindo seu máximo em aproximadamente 1 MHz, em concordância com o resultados obtidos por [4], [5]. Também é observado que o efeito capacitivo da malha é predominante entre as frequências de 50 kHz e 300 kHz. Esse fato pode ser explicado devido que para frequências elevadas, a corrente de deslocamento é predominante em relação a corrente de condução. No entanto, para frequências acima de 300 kHz, o efeito indutivo da malha de aterramento se torna predominante, e a fase aumenta com a frequência, atingindo seu máximo em aproximadamente 1 MHz, em concordância com [5].

Observa-se, ainda, que, de forma geral, a fase da impedância harmônica não varia significativamente com a amplitude da corrente injetada para todos os casos estudados. No entanto, o módulo da impedância harmônica tem variação para altas frequências, isso pode ser explicado devido ao fato de interferências eletromagnéticas em alta frequência.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo foram analisados o comportamento transitório de uma malha de aterramento de subestação de distribuição submetida a correntes impulsivas, contemplando impedância harmônica de aterramento. Os parâmetros utilizados foram a intensidade da corrente injetada e o tempo de frente das formas de onda da corrente injetadas na malha de aterramento ensaiada.

Quando se analisa o módulo da impedância harmônica com relação às três amplitudes da corrente impulsiva injetada conclui-se que: o módulo da impedância harmônica teve alterações em altas frequências.

Quando se analisa o módulo da impedância harmônica com relação às formas de onda observa-se que: com a redução do tempo de frente, o módulo da impedância harmônica tem seu valor aumentado a partir de menores frequências; para todos os casos estudados, o módulo tem seu máximo em aproximadamente 1 MHz.

Quando se analisa a fase da impedância harmônica com relação às três amplitudes da corrente impulsiva injetada conclui-se que: a fase da impedância harmônica não teve alterações significativas

Quando se analisa a fase da impedância harmônica com relação às formas de onda observa-se que: para as correntes das Configurações 2 e 3, a fase apresentou comportamento capacitivo entre 40 kHz e 300 kHz; para as corrente da Configuração 1, a fase da impedância harmônica apresentou comportamento resistivo até aproximadamente 100 kHz; para frequências acima de 400 kHz, em todos os casos estudado, a fase tem seu comportamento predominantemente indutivo.

Novos estudos experimentais serão realizados para verificar tais comportamentos. Para minimizar as interferências eletromagnéticas, os sinais de corrente e tensão serão medidos a partir de fibras ópticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG (COPELE), à CAPES, ao CNPq e ao INCT NAMITEC pelo apoio financeiro.

Referencias

- [1] VISACRO, S. Aterramentos Elétricos. Ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2005.
- [2] TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D.; RAIZER, A.; ALMAGUER, H. G.; MUSTAFA, T. I.; COELHO, L. V. Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixas e Altas Frequências. Ed. Porto Alegre: ediPUCRS, 2007.
- [3] VISACRO, S. — Resposta dos aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas. XIX SNPTTE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GrupoX – Sobreensões e Coordenação de Isolamento, Rio de Janeiro, Outubro de 2007.
- [4] VISACRO, S.; ROSADO, G., "Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.51, no.1, pp.161,164, Fevereiro de 2009.
- [5] AKBARI, M.; SHESHYEKANI, K.; ALEMI, M. R. The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 55, NO. 4, AUGUST 2013.