

AVALIAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO DA RESPOSTA TRANSITÓRIA 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 impulsiva e impedância transitória, 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 impulsiva tem variação desprezível quando se manteve a forma de onda do sinal de corrente aplicado no solo e variou-se a sua intensidade. Os resultados demonstram que o sinal com menor tempo de frente (maior frequência) apresentou maior impedância impulsiva e consequentemente a menor impedância impulsiva foi obtida com o sinal de maior tempo de frente (menor frequência). Para todos os casos, a impedância impulsiva teve seu valor maior que a resistência em baixa frequência, exceto para a corrente com maior tempo de frente utilizado nesta pesquisa. Já a impedância transitória, teve seu comportamento semelhante em todos os casos estudados, atingindo o regime permanente em torno da resistência em baixa frequência.

Palavras Chave— Impedância impulsiva, impedância transitória, corrente impulsiva, malha de aterramento.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos são planejados no intuito de otimizar a operação e promover sua máxima confiabilidade, assegurando o fornecimento da energia de forma ininterrupta e com qualidade. Neste contexto, as malhas de aterramento são de extrema importância no que concerne à segurança de pessoas e equipamentos instalados no sistema elétrico [1].

Uma malha de aterramento é constituída de hastes de aço cobreada, conectadas via soldas exotérmicas a cabos de cobre, geralmente dispostos de forma retangular. A utilização dessa configuração de aterramento objetiva a mitigação dos efeitos causados pelas sobretensões oriundas de descargas atmosféricas e correntes de curtos-circuitos [2]. Dentro deste contexto, o principal objetivo de uma malha de aterramento é fornecer um caminho de baixa impedância para essas correntes, mantendo os potenciais elétricos dentro de limites de segurança de modo a não causar fibrilação ventricular ou

que possam causar danos a equipamentos localizados nas proximidades do surto.

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 [1]. No entanto, o comportamento dos eletrodos de aterramento para altas frequências é distinto em relação à resposta desses eletrodos para baixas frequências [2]. Esta diferença de comportamento deve-se, principalmente, pelos efeitos de propagação das ondas de tensão e corrente ao longo dos eletrodos, sendo influenciada também pela dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência e pelo efeito da ionização do solo, que se traduz na redução da impedância de aterramento [1] e [2].

Os parâmetros que caracterizam sistemas aterramento submetidos 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 os parâmetros no domínio do tempo, pelo fato da impedância impulsiva representar o maior valor de impedância apresentada pelo sistema de aterramento na ocorrência do surto [1]. Já a impedância transitória fornece o comportamento da impedância ao longo do tempo.

No domínio do tempo, 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 impulsiva de aterramento (Z_p) que é a razão entre os valores de pico da onda de tensão (V_p) e corrente (I_p) no mesmo espaço, como mostra a Equação 1 [2].

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (1)$$

A impedância transitória $z(t)$ é dada pela razão da tensão $v(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente e a corrente $i(t)$ injetada, considerando a variação do sinal no tempo como mostra a Equação 2 [2].

$$Z(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (2)$$

Um estudo do Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [3], concluiu que as descargas atmosféricas causam prejuízos anuais da ordem de um bilhão de reais ao país. Por causa desse imenso prejuízo, se faz necessário um estudo experimental de configurações complexas de sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas, já que grande parte dos estudos experimentais são baseados em configurações simples de aterramento, como uma única haste enterrada no solo, como os resultados obtidos por [4]. Neste trabalho, é apresentada uma avaliação da impedância impulsiva e da impedância transitória de uma malha de aterramento típica de subestação de distribuição submetida a impulsos de corrente elétrica de alta intensidade, em relação à amplitude da corrente injetada no solo, como também ao tempo de frente da onda impulsiva. Ensaios semelhantes foram realizados por [5], no entanto, os autores utilizaram sinais de corrente impulsivos de baixa amplitude, com isso, não foi possível, verificar o efeito da ionização do solo.

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 de teste 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 de cobre nu com 50 mm² de seção transversal, através de soldas exotérmicas.

A malha do gerador de impulso é constituída de 6 hastes de verticais de aço revestidas por cobre, com 2,4 m de comprimento e 12,2 mm de diâmetro, interligadas por cabos de cobre nu com 70 mm² de seção transversal, através de soldas exotérmicas. Os elementos da malha do gerador estão dispostos ao longo de um círculo com raio de 3 m.

B. Métodos

Para obter os resultados, foram aplicados na malha de aterramento impulsos de corrente elétrica produzidos a partir de um gerador de impulsos de corrente elétrica de 80 kJ/100 kV. O circuito elétrico do gerador de impulso está ilustrado na Figura 1.

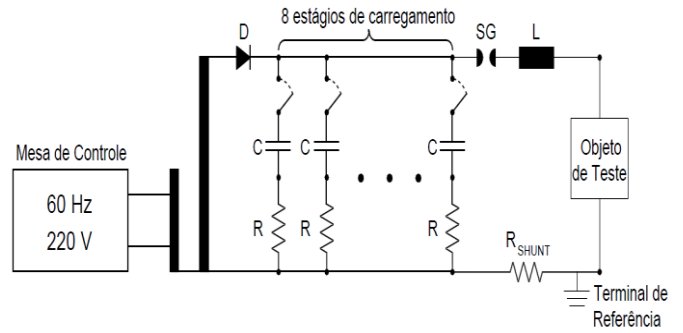


Figura 1. Circuito elétrico do gerador de impulso.

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.

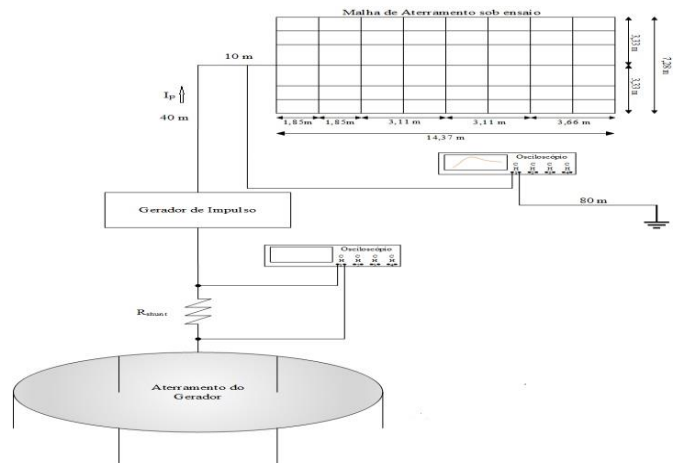


Figura 2. Circuito elétrico utilizado nos ensaios experimentais.

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. Também foi utilizado uma haste auxiliar de 1 metro de comprimento posicionada a 80 metros de distância da malha de aterramento sob teste. A sua função é o estabelecimento de uma referência de potencial. Foram realizadas medições sucessivas deslocando a haste de referencia e essa distância foi determinada a partir não havia mais diferença no valor de tensão medido ao se afastar da malha a haste de referência.

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 impulsiva (Z_p) é obtida pela razão entre os valores de pico da tensão (V_p) estabelecida no eletrodo de injeção de corrente e da corrente (I_p) aplicada na malha de aterramento conforme a Equação (1). A impedância transitória $z(t)$ é dada pela razão da tensão $v(t)$ desenvolvida no eletrodo de injeção de corrente e a corrente $i(t)$ injetada conforme a Equação 2.

Foram utilizadas três configurações do gerador de impulso, resultando em três formas de onda de corrente com tempo de frente e meia cauda distintos. Os resultados contemplam a elevação do potencial em relação ao terra remoto, impedância impulsiva e a impedância transitória para três intensidades de corrente distintas, para cada sinal de corrente impulsivo adquirido 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 Ω .

A resistividade (ρ_a) do solo (baixa frequência) foi estimada a partir da resistência (R) da malha de aterramento ensaiada, utilizando-se a Equação (3) [6].

$$R = \rho_a \left\{ \left(\frac{1}{L_t} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{1}{1 + H\sqrt{20 \cdot A}} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

sendo:

L_t : Comprimento total dos condutores enterrados, expresso em metros [m];

H : Profundidade da malha, expressa em metros [m];

A : Área ocupada pela malha, expressa em metros quadrados [m²].

Utilizando-se a Equação (3), determinou-se a resistividade aparente do solo $\rho_a = 127,27 \Omega \cdot m$.

A. Configuração 1 do gerador de impulso

A Figura 3 ilustra os três sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada. A configuração do gerador, para essas formas de onda é:

- 3 estágios;
- Resistor = 17,5 Ω ;
- Indutor = 0,885 μH ;
- Capacitor = 2 μF .

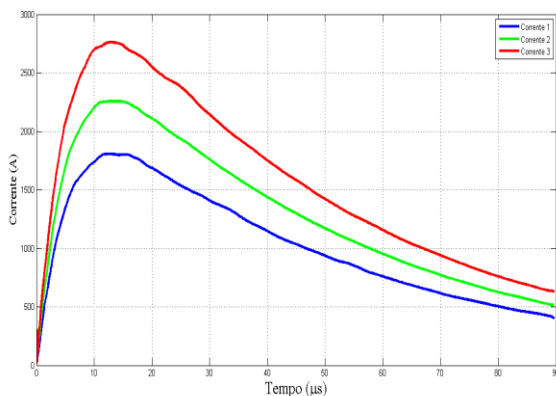


Figura 3. Correntes injetadas na malha de aterramento ensaiada.

A tabela 1 apresenta os tempos de frente e meia cauda dos sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada.

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

Corrente injetada	Tempo de frente [μs]	Tempo de meia 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.

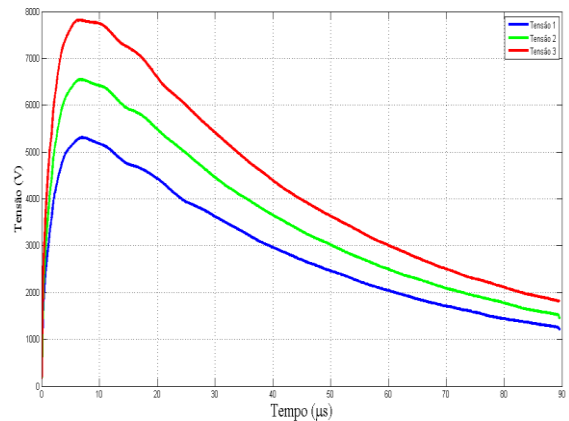


Figura 4. Elevação de potencial em relação ao terra remoto.

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

Os valores das impedâncias impulsivas considerando os três sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Impedância impulsiva.

Corrente injetada	Z_p [Ω]
Corrente 1	2,96
Corrente 2	2,91
Corrente 3	2,79

A Figura 5 ilustra a impedância transitória para cada sinal de corrente impulsivo injetado na malha de aterramento ensaiada.

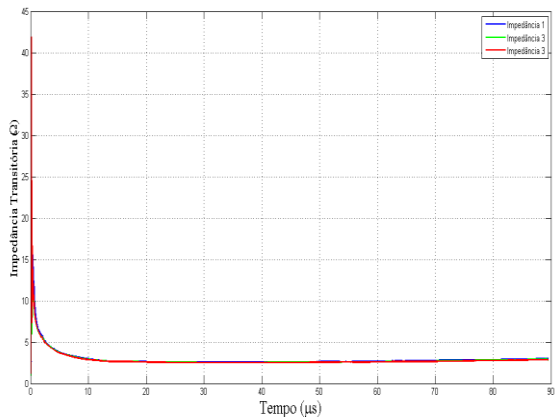


Figura 5. Impedância transitória.

B. Configuração 2 do gerador de impulso

A Figura 6 ilustra os três sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada. A configuração do gerador, para essas formas de onda é:

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

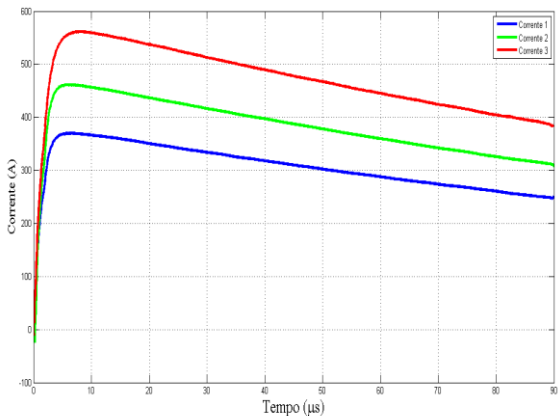


Figura 6. Correntes injetadas na malha de aterramento ensaiada.

A Tabela 4 apresenta os tempos de frente e meia cauda dos sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada.

Tabela 4 - Tempo de frente e meia cauda das correntes injetadas no eletrodo.

Corrente injetada	Tempo de frente [μs]	Tempo de meia 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 7 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.

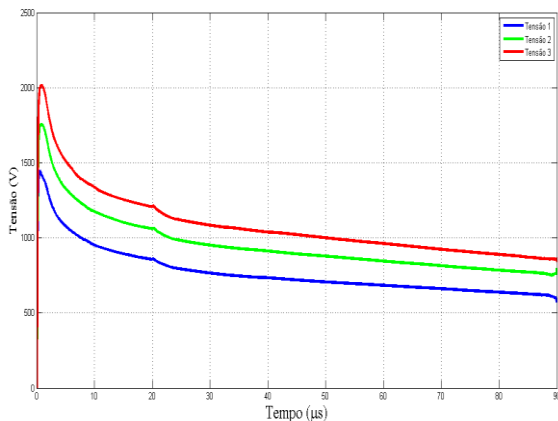


Figura 7. Elevação de potencial em relação ao terra remoto.

A tabela 5 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 5 - 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

Os valores das impedâncias impulsivas considerando os três sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Impedância impulsiva.

Corrente injetada	Z _p (Ω)
Corrente 1	4,67
Corrente 2	4,71
Corrente 3	4,42

A Figura 8 ilustra a impedância transitória para cada sinal de corrente impulsivo injetado na malha de aterramento ensaiada.

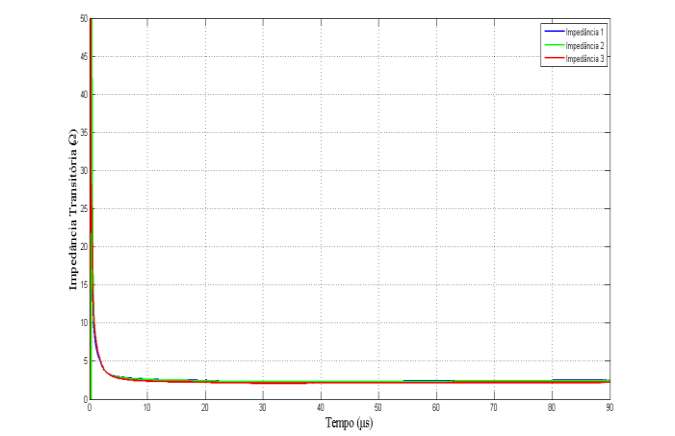


Figura 8. Impedância transitória.

C. CONFIGURAÇÃO 3 DO GERADOR DE IMPULSO

A Figura 9 ilustra os três sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada. A configuração do gerador, para essas formas de onda é:

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

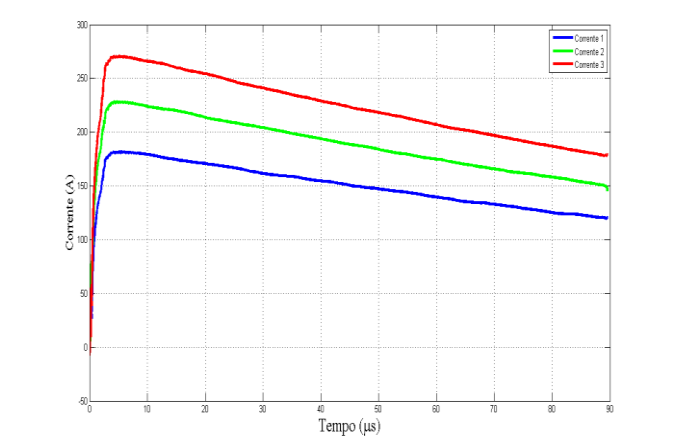


Figura 9. Correntes injetadas na malha de aterramento ensaiada.

A tabela 7 apresenta os tempos de frente e meia cauda dos sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada.

Tabela 7 - Tempo de frente e meia cauda das correntes injetadas no eletrodo.

Corrente injetada	Tempo de frente (μs)	Tempo de meia 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 10 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.

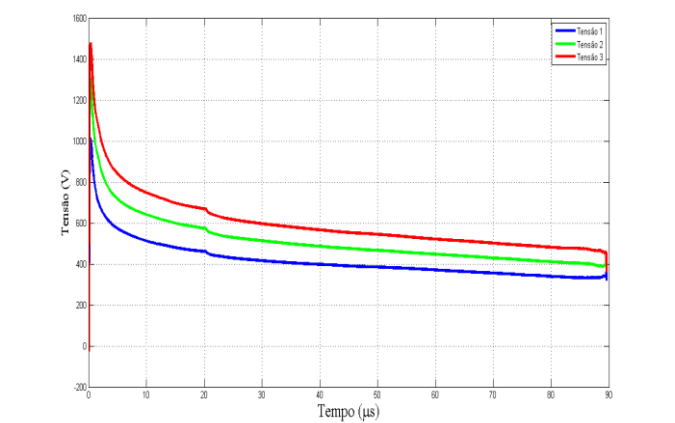


Figura 10. Elevação e potencial em relação ao terra remoto.

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

Os valores das impedâncias impulsivas considerando os três sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Impedância impulsiva.

Corrente injetada	Z _p (Ω)
Corrente 1	6,00
Corrente 2	5,96
Corrente 3	5,93

A Figura 11 ilustra a impedância transitória para cada sinal de corrente impulsivo injetado na malha de aterramento ensaiada.

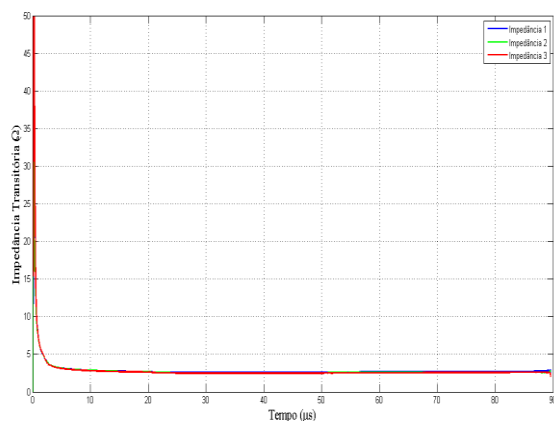


Figura 11. Impedância transitória.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analizando-se os resultados, observa-se que a impedância impulsiva varia quando impulsos de diferentes frequências foram aplicados no solo. Os resultados obtidos estão de acordo com aqueles obtidos por [4] e [5] em que o sinal com menor tempo de frente (maior frequência) apresentou maior impedância impulsiva e consequentemente a menor impedância foi obtida com o sinal de maior tempo de frente (menor frequência). Observa-se, ainda, que, de forma geral, a impedância impulsiva não varia com a intensidade da corrente injetada. Para a configuração 1 do gerador de impulso, a impedância impulsiva foi menor que a resistência em baixa frequência, em concordância com resultados obtidos por [4], evidenciando-se que o comprimento da malha de aterramento ensaiada é menor que seu comprimento efetivo para esse sinal de corrente impulsivo. Para a configuração 2 e 3 do gerador de impulso, a impedância impulsiva foi maior que a resistência em baixa frequência, em concordância com os resultados obtidos por [5], evidenciando-se que o comprimento da malha de aterramento ensaiada é maior que seu comprimento efetivo para esses sinais de corrente impulsivo.

Analizando os tempos de frente da corrente e tensão, observa-se que a tensão desenvolvida no eletrodo de injeção de corrente é adiantada em relação à corrente injetada, evidenciando assim um comportamento indutivo, tendo esse comportamento mais pronunciado para correntes com tempo de frente mais rápidos.

As impedâncias ilustradas nas Figuras 5, 8 e 11, decrescem até 10 μ s e se estabiliza em torno da resistência em baixa frequência. Para todos os casos, a impedância transitória não varia com a intensidade da corrente injetada.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo foram analisados o comportamento transitório de uma malha de aterramento de subestação de distribuição submetida a correntes impulsivas, contemplando a elevação do potencial em relação ao terra remoto, impedância impulsiva e impedância transitória. Os parâmetros utilizados na análise foram a intensidade e o tempo de frente dos sinais de correntes impulsivos injetados na malha de aterramento ensaiada.

Quando se analisa o comportamento da impedância transitória e impedância impulsiva com relação às três amplitudes da corrente impulsiva injetada observa-se que: Não houve variação significativa nos valores da impedância impulsiva e impedância transitória, concluindo-se que não houve o fenômeno da ionização do solo.

Quando se analisa o comportamento da impedância transitória e impedância impulsiva com relação ao tempo de frente do sinal de corrente impulsivo constata-se que: a impedância impulsiva é inversamente proporcional ao tempo de frente do sinal de corrente impulsivo; A impedância transitória teve comportamento semelhante para todos os casos estudados, estabilizando-se em aproximadamente 10 μ s em torno da resistência de baixa frequência.

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.

Referências

- [1] 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.
- [2] VISACRO, S. Resposta dos aterramentos elétricos frente a correntes de descarga atmosférica. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2007.
- [3] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 25/01/2016.
- [4] CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; BRITO, V. S.; LIRA, G. R. S.; GONÇALVES, M. F. B. R. Avaliação Experimental da Impedância em um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Foz do Iguaçu, Brasil, 2014.
- [5] GUIMARÃES, M. N.; ARAUJO, L. R. V. C.; SANTOS, L. F. D.; VALE, M. H. M. S.; VISACRO, S. Impulse Response of Grounding Grids: Experimental versus Simulated Results. 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria.
- [6] NBR 15749. Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. ABNT, 2009.