



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GAT/04
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

ENSAIOS COM VARREDURA DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE ATERRAMENTO E MEDIDAS DE IMPEDÂNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM SISTEMAS ENERGIZADOS

**Marcelo E. de C. Paulino(*)
Adimarco**

**Rafael Fernandes
GE Energy**

RESUMO

Esse trabalho descreve e mostra um método avançado para medir e calcular os parâmetros de linha de transmissão, a comparação com dados calculados e também simulados. Todas as medições são realizadas com variação de frequência, abaixo e acima da frequência da rede e os resultados são interpolados, eliminando-se interferências de sistemas energizados. O trabalho também descreve os procedimentos de teste e mostra os resultados de medida realizada em uma linha de transmissão de uma empresa de distribuição de energia elétrica e a comparação dos resultados medidos e simulados com os resultados de projeto.

PALAVRAS-CHAVE

Variação de Frequência, Resistência de Aterramento, Parâmetros de Linha, Linhas de Transmissão, Fator de Terra.

1.0 - INTRODUÇÃO

Diferentes fatores influenciam o tempo de operação de um relé de proteção de linha. Esses fatores estão relacionados com o projeto e o princípio de funcionamento, além dos parâmetros de impedância da linha a ser protegida e da precisão dos cálculos das correntes de curto circuito. Isto implica na obtenção correta e precisa de parâmetros como o valor de sequência positiva e sequência zero ou o fator de terra correspondente (fator K_L ou K_0).

As impedâncias de linha de transmissão utilizadas para o cálculo de curto circuito e a configuração dos relés de distância são normalmente obtidas dos resultados de cálculos realizados em programa de linha, utilizando de valores característicos genéricos constantes preestabelecidos. Devido ao grande número de fatores que influenciam esses cálculos (por exemplo, tipos de cabos do sistema de transmissão, resistividade do solo), eles podem apresentar erros.

A medida em campo da impedância da linha de transmissão e da impedância do loop de falta é a melhor maneira de assegurar que os ajustes dos relés de proteção sejam realizados de forma adequada. Para a determinação dos parâmetros desses ajustes, as impedâncias fase-fase podem ser calculadas com exatidão aceitáveis. Entretanto, as impedâncias fase-terra têm que ser medidas, pois sua determinação através de cálculos matemáticos não satisfaz as condições reais de resistência de terra específicas, levando-se em consideração as partes metálicas, cabos e outras partes condutoras aterradas que compõem a instalação. O acoplamento mútuo entre as linhas de transmissão também deve ser medido. Os métodos convencionais necessitam elevadas correntes de teste para obter uma relação sinal/ruído aceitável e não são muito precisos. Esse trabalho descreve e mostra um método avançado para medir e calcular os dados de impedância da linha de transmissão e a comparação com dados calculados. Todas as medições são realizadas com variação de frequência, abaixo e acima da frequência da rede e os resultados são interpolados, eliminando-se interferências de sistemas energizados. A partir destes resultados as

(*) Av das Américas, n° 500 – sala 202 - Bloco 10 – CEP 22.640-100 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 24947140 – Cel: (+55 21) 993741232 – Email: mecgpaulino@yahoo.com.br

impedâncias de sequência positiva e sequência de zero, bem como o fator K em vários formatos são calculadas.

O princípio de medição é realizado utilizando um processador digital de sinal (DSP) gerando sinais senoidais em uma faixa de frequência de 15 a 400 Hz. Essa variação de frequência vai garantir a medida em ambientes com interferência e ruídos. Quando as medições são realizadas em frequências diferentes da frequência da linha, elas também podem ser feitas em condições inadequadas, sem interferência de qualquer problema. O valor da impedância na frequência da linha pode ser determinado por interpolação da curva de impedância por frequência. O método descrito é ideal também para determinação de impedância de terra e medidas de acoplamento.

Da mesma forma, para a medida de resistência de sistemas de aterramento, algumas alternativas consagradas como o método da queda de potencial com injeção de corrente trazem resultados confiáveis quando se trabalha com sistemas desenergizados. Uma alteração no procedimento convencional, como a utilização de uma fonte com alta tecnologia que permite a variação da frequência do sinal gerado para injeção de corrente, possibilita a execução de ensaios em sistemas de pequenos e grandes portes em circunstâncias de operação normal, totalmente energizados. A utilização de uma frequência diferente da frequência fundamental possibilita eliminar todas as interferências causadas pelos sistemas e permite também a realização de um ensaio com maior nível de segurança, uma vez que a corrente injetada não precisa ser de alta intensidade. O trabalho descreve os procedimentos de teste e mostra os resultados de medida realizada em uma linha de transmissão de uma empresa de distribuição de energia elétrica e a comparação dos resultados medidos com simulações.

2.0 - LINHAS DE TRANSMISSÃO E O FATOR DE TERRA

Para proteger linhas de transmissão aéreas ou cabos de potência são necessários esquemas de proteção associados a dispositivos específicos. Quando ocorre uma falha no sistema de transmissão, seja entre as fases ou uma falha para terra, essa falha deve ser eliminada de forma seletiva, rápida e precisa. A seletividade deve ser obtida com o isolamento da falha e a desconexão de linha de onde ocorreu a falha. Existem métodos básicos para se obter a seletividade em linhas de transmissão com esquemas de proteção de distância ou diferencial de linha.

No caso da atuação de uma proteção de distância em uma linha de transmissão, os IEDs nos extremos da linha medem a impedância até o ponto de ocorrência da falha. É determinada uma primeira zona de proteção, ajustada com alcance de 80% a 90% da impedância total da linha, com tempo de atuação instantâneo (tempo de ajuste de 0 segundos). Os erros de medida dos transformadores de corrente e tensão, e as estimativas da impedância de linha e terra impedem o ajuste de primeira zona a 100%.

Para falhas de uma ou mais fases para terra, a impedância do circuito de falha é composta por uma parte da impedância da linha de transmissão mais uma parte da impedância de retorno por terra. A impedância de curto circuito para terra então é ajustada pelo uso do fator de terra (ou fator de compensação para faltas à terra) denominado K_0 ou K_L . Estão disponíveis várias maneiras de inserir o fator para permitir a entrada simples do parâmetro diretamente das configurações dos relés, como, por exemplo, a relação entre a impedância de linha (Z_L) e a impedância de terra (Z_E).

$$K_L = \left(\frac{Z_E}{Z_L} \right) = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{Z_0}{Z_1} - 1 \right) \quad (1)$$

Onde:

- Z_0 é a impedância de sequência zero da linha protegida
- Z_1 é a impedância de sequência positiva da linha protegida
- Z_E é a impedância de terra do loop da falha (sem compensação)
- Z_L é a impedância da linha até o alcance da falha.

No sistema de proteção de sistemas de potência é necessário em alguns casos assumir um risco, minimizando ao máximo as aproximações ou estimativas realizadas. Este é o caso da determinação do fator de terra K_0 , ajustando-se a primeira zona menor que a impedância da linha para evitar problemas de sobrealcance. A precisão do K_0 afeta a localização da falha pela proteção de distância. Uma estimativa inadequada do fator K_0 provocará problemas de sobrealcance ou subalcance. Para falhas a terra, a impedância vista pela pelo sistema de proteção é dado por:

$$Z_L = \left(\frac{U}{I - K_0} \right) \quad (2)$$

O ajuste inadequado de K_0 pode permanecer escondido no sistema potência por muitos anos sem causar nenhum problema até que a proteção seja necessária atuar levando em consideração o fator de terra. Assim essa inadequação do ajuste de proteção vai aparecer no momento mais inoportuno, seja no caso de sobrealcance com a perda de seletividade ou atuação errada em linhas paralelas ou seja no caso de subalcance com atraso na atuação

da proteção.

3.0 - SIMULAÇÕES E CÁLCULOS DOS PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Existem muitas ferramentas de software para calcular os parâmetros da linha de transmissão e estimar o fator K_0 , tais como ATP, CAPE, PowerFactory, etc. São diversos os dados necessários para realizar o cálculo da impedância de uma linha e pode-se cometer erros. Para esse cálculo é necessário:

- A configuração geométrica da torre de transmissão
- A altura da torre
- A distância horizontal de cada condutor de fase e o cabo de terra
- Altura média dos cabos acima do solo,
- Valor médio das catenárias ao longo da linha
- A resistividade do terreno ρ

As características dos condutores de fase e terra:

- Resistência ôhmica
- Características construtivas (GMR, condutores por fase, etc.)
- Diâmetro

2.1 Simulações em Linhas de Transmissão de 138kV e 765 KV

Para o cálculo dos parâmetros elétricos de uma Linha de Transmissão utilizou-se, como exemplo, os dados de silhueta de torre de 138kV e de 765kV. Inicialmente, calculou-se os parâmetros para uma frequência de 60 Hz e após a redução da matriz de dimensão 14×14 , considerando-se dois cabos para-raios, para dimensão 3×3 , realizou-se a transposição, encontrando as componentes de sequência das impedâncias e admitâncias. Após essa etapa, variou-se a frequência de 0Hz até 1.000.000Hz e analisou-se o comportamento da resistência e da indutância. As simulações foram realizadas utilizando-se os softwares Matlab e ATP.

O primeiro passo foi dispor todos os condutores de tal forma que, na matriz primitiva de impedância e admitância, as três primeiras linhas e colunas correspondessem aos subcondutores a1, b1 e c1, e a 4ª e 5ª linhas e colunas, correspondessem aos para-raios. Essa disposição torna-se necessária para que, na redução de Kron, seja possível incluir o efeito dos cabos para raios nas fases. Para a montagem da matriz de impedância, utilizou-se o cálculo aproximado através da distância complexa. Para obter a impedância apenas do solo, foi necessário o cálculo da impedância externa considerando o solo ideal e, após isso, diminuir essa parcela da impedância externa com solo real. A impedância total é dada pela soma entre a impedância externa com solo real e a impedância interna e é chamada de impedância primitiva. Nesse estágio a dimensão da matriz é 14×14 . Em seguida a matriz é reduzida para dimensão 3×3 . O cálculo da admitância desta linha de transmissão é somente função das posições relativas dos condutores entre si e em relação ao solo. A sua parte real é nula uma vez que a condutância do ar para linhas aéreas é desprezível. Tanto a matriz impedância como admitância, possuem dimensão 14×14 .

Para a redução são consideradas as seguintes hipóteses:

- Os cabos para-raios são considerados aterrados em todas as estruturas, fazendo com que a tensão fase-terra nesses cabos seja nula.
- A corrente total por feixe de cada fase é correspondente à soma das correntes dos subcondutores no feixe.
- A tensão em cada subcondutor é igual a tensão de fase equivalente.

Nas matrizes reduzidas, os subcondutores do feixe de cada fase são representados por um condutor equivalente representando a fase. Após a eliminação dos feixes, eliminam-se os cabos para-raios, supondo-os aterrados continuamente, as suas contribuições nas matrizes de parâmetros são incorporadas aos elementos equivalentes de cada fase. Após a redução de Kron, as matrizes impedância e admitância são reduzidas a dimensão 3×3 . Após, realiza-se a transposição e encontra-se a matriz de impedância ou admitância em componentes de sequência que é dada por:

$$Z_{012} = \begin{pmatrix} Z_p + 2 \cdot Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_p - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_p - Z_m \end{pmatrix} \quad (3)$$

A execução do programa é realizada para as frequências de 0 a 1.000.000Hz, e traçados os gráficos levando em conta a variação da resistência e indutância para o condutor a1, correspondente a posição (1,1) da matriz impedância primitiva ou admitância primitiva, e a mutua entre o condutor a1 e o condutor b1, que corresponde a posição (1,2).

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos das impedâncias de modo e de fase, pelo ATP e pelo Matlab para uma linha de transmissão de 765kV de acordo com as rotinas estabelecidas, mostrando a convergência dos resultados nas duas ferramentas de simulação. Esses resultados foram obtidos com o objetivo de mostrar a

tendência da variação dos parâmetros da linha de transmissão com a frequência, principalmente a resistência e a indutância interna da linha de transmissão, bem como a influência do efeito pelicular na variação da resistência primitiva ou total (interna, mútua mais solo).

De acordo com a Figura 1, a impedância de sequência positiva encontrada é: $Z_1 = 0,0159 + j0,3393[\Omega/Km]$. Este resultado é muito próximo ao encontrado pelo software ATP, conforme mostrado na figura 2. A análise dos resultados mostra que há variação da resistência em relação a frequência, observa-se que a resistência externa com solo real corresponde a parcela resistiva do solo e apresenta um aumento linear conforme a frequência aumenta. Verifica-se também que tanto a parcela própria, quanto a mútua do solo, possuem valores iguais

A resistência interna se mantém praticamente constante até 100 Hz, onde a partir desse valor começa a aumentar linearmente (figura 4a). Como a resistência primitiva ou total, mostrada na figura 4b, é a soma entre a resistência interna e a resistência externa com solo real, ela também não sofre aumentos consideráveis até a ordem de 100Hz, a partir daí ela aumenta com o aumento da frequência, devido à elevação das resistências internas e externas com solo real.

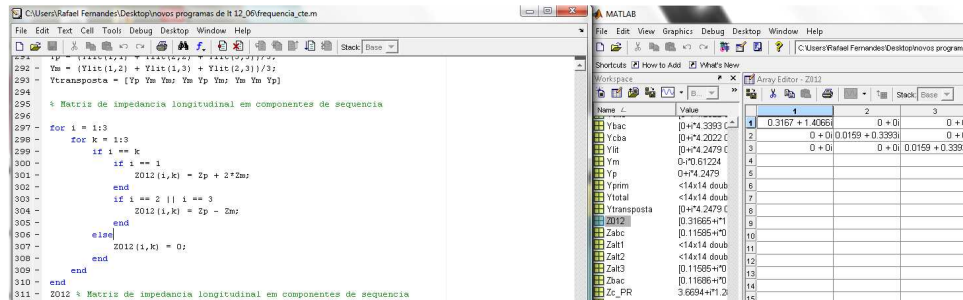


Figura 1. Resultados gerados pelo Matlab – LT 765kV em $[\Omega/Km]$

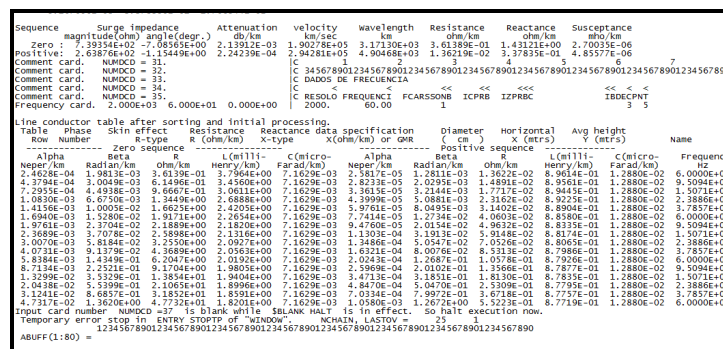


Figura 2. Resultados gerados pelo ATP – LT 765kV

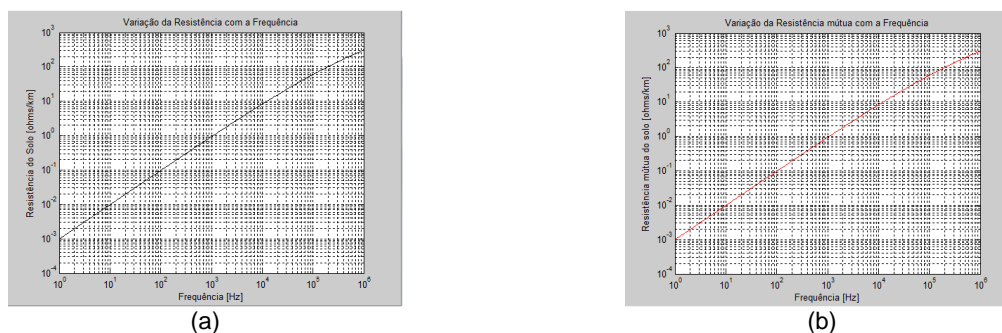


Figura 3. Resultados gerados pelo Matlab – LT 765kV: (a) Resistência externa com a frequência; (b) Resistência mútua com a frequência

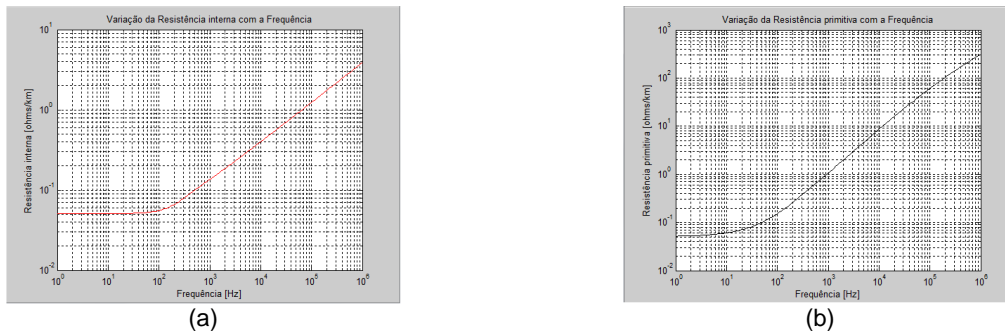


Figura 4. Resultados gerados pelo Matlab – LT 765kV: (a) Resistência interna com a frequência; (b) Resistência primitiva com a frequência

Nas simulações realizadas verificou-se que se o solo for considerado ideal, a indutância externa do condutor se torna contínua, não variando com a frequência. Verifica-se também que a indutância interna (figura 5a) é baixa e que a partir de 200Hz, sua contribuição na indutância primitiva pode ser desprezada. Ao analisar a indutância do solo, verifica-se que ela apresenta uma queda com o aumento da frequência. Logo, conclui-se que a indutância primitiva (figura 5b) é função da impedância externa com solo real e a indutância interna, sendo que sua queda se deve a queda da indutância no solo.

Os resultados obtidos praticamente repetiram qualitativamente os resultados das simulações em linha de transmissão de 765kV. A linha de transmissão de 138kV simulada possui um comprimento de 21km. Essa configuração e o tamanho da linha foram escolhidos com o objetivo de simular os resultados práticos apresentados a seguir. A figura 6 mostra os valores sequências desta referida linha, sendo que a impedância de sequência positiva total, em 60Hz, é: $Z_1 = (0,0192 + j0,6937) \times 21 = 4,032 + j14,5677 [\Omega]$

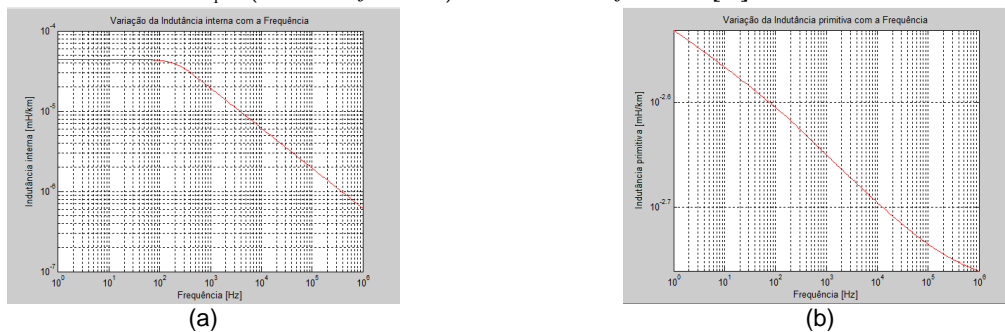


Figura 5. Resultados gerados pelo Matlab – LT 765kV: (a) indutância interna com a frequência; (b) Indutância primitiva com a frequência

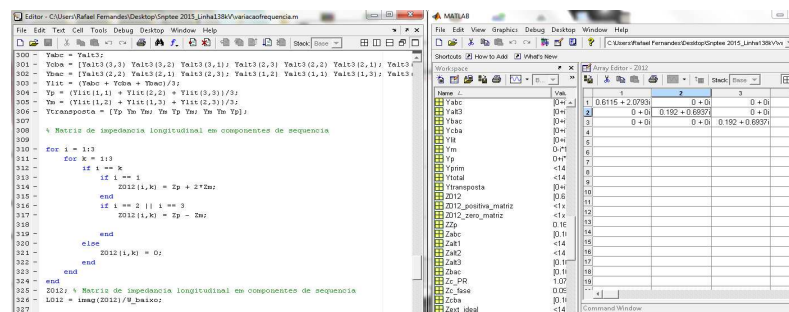


Figura 6. Resultados gerados pelo Matlab – LT 138kV em $[\Omega/\text{Km}]$

As figuras 7a e 7b mostram a resistência e indutância interna com a frequência, respectivamente.

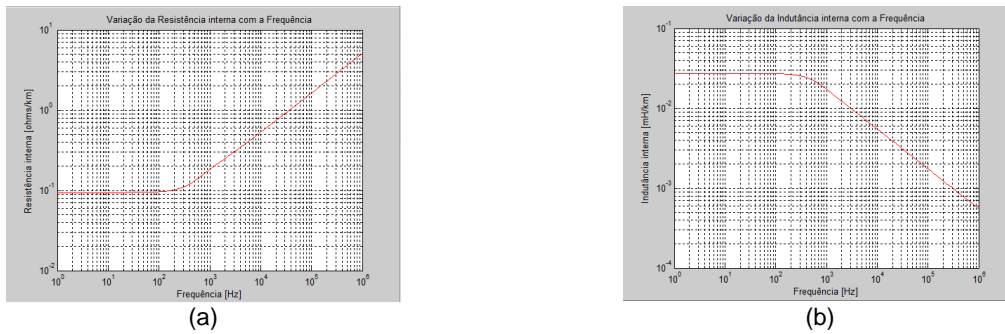


Figura 7. Resultados gerados pelo Matlab – LT 138kV: (a) Resistência interna com varredura de frequência até 1MHz; (b) Indutância interna com varredura de frequência até 1MHz.

Assim, verifica-se que há uma variação muito baixa da resistência e indutância interna na faixa de 40 a 100Hz, sendo possível, desta forma, linearizar tais valores encontrados. Assim, se focarmos nossa análise na faixa de frequência das medidas realizadas pelos procedimentos descritos neste trabalho, ou seja, de 40 a 100 Hz, podemos concluir que:

- A variação da Indutância total é linear nesta faixa de frequência, e consequentemente a variação da reatância também será.
- A variação da resistência total nesta faixa de frequência tem gradiente praticamente constante, portanto podemos considerar uma variação linear.

Tais conclusões foram constatadas pelos resultados dos ensaios realizados em campo, conforme será apresentado neste trabalho.

4.0 - MEDIDA DA IMPEDÂNCIA DE LINHA E FATOR DE TERRA K_0

O princípio de medição é realizado utilizando um processador digital de sinal (DSP) gerando sinais senoidais em uma faixa de frequência de 15 a 400 Hz. Este sinal é alimentado por um amplificador com fonte chaveada.

Atualmente, com as novas tecnologias disponíveis nos equipamentos de teste primários, a medida dos parâmetros da linha, incluindo o fator de terra K_0 , é relativamente simples e seguro. A medida é realizada com corrente entre 1 e 100 A, dependendo do tamanho da linha de transmissão. Como o princípio de medição é realizado utiliza um processador digital de sinal gerando sinais senoidais em uma faixa de frequência de 15 a 400 Hz, tem-se a filtragem de sinais com frequência diferentes da frequência de linha 50/60Hz, permitindo o teste com correntes reduzidas. Até este momento, as tentativas para medir as impedâncias de linha e fatores de terra eram muito difíceis e deveriam ser utilizados altos sinais de correntes para obter-se uma relação sinal/ruído adequado. Os equipamentos da subestação são desconectados do sistema, deixando a linha desenergizada e isolados do sistema de potência. São realizadas sete medidas por cada sistema trifásico testado:

- Medidas das fases: AN, BN, e CN;
- Medidas entre fases: AB, BC, CA;
- Medida Trifásica: ABC.

Desta forma existe redundância das medições e permite fazer comprovações cruzadas dos resultados e o cálculo do fator de terra K_0 para cada fase. É importante ressaltar que as medidas de impedância não são realizadas na frequência de linha 50/60 Hz, conforme será mostrado na aplicação descrita neste trabalho.

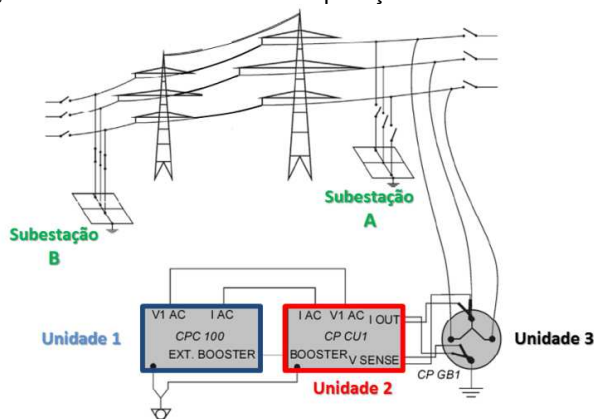


Figura 8. Estrutura de teste e conexão dos equipamentos a linha de transmissão

A parte mais crítica do teste é a segurança do testador, especialmente em um circuito duplo, com uma linha paralela energizada, devido as sobretensões induzidas pelos efeitos capacitivo e indutivo do sistema de transmissão.

Em alguns casos não será possível a realização do teste a menos que as duas linhas sejam postas fora de serviço. Um dado adicional fornecido pelo teste é que, com as medidas da impedância de sequência zero Z_0 por fase é possível analisar a simetria da linha e determinar a necessidade da realização de uma transposição para o balanceamento da mesma e a obtenção de todos os benefícios conhecidos.

5.0 - APLICAÇÃO EM LINHA DE TRANSMISSÃO DE 138 KV

Foram utilizados neste trabalho os testes realizados em uma linha de transmissão de 138 kV na região sul do Brasil como objetivo de demonstrar a técnica descrita. Não foram obtidos os dados calculados para comparação. A linha de transmissão possui 20,1 km de extensão. A figura 9 mostra o esquema de conexão conforme procedimento descrito e a disposição dos equipamentos em campo para medida, onde:

- Equipamento A: unidade de geração dos sinais com variação de frequência e processamento de dados. Possui Processador Digital de Sinal (DSP) que gera sinais senoidais numa faixa de frequência de 15 a 400 Hz e medidores seletivos para medidas em diferentes frequências.
- Equipamento B: Unidade de acoplamento e medida do sistema testado.
- Equipamento C: Unidade para proteção contra sobretensão, destinada a conectar a unidade B ao sistema ou equipamento em teste. Se ocorrer uma sobretensão entre os terminais de teste, um supressor de surto atuará curto-circuitando o sinal para o aterramento, protegendo o pessoal técnico e equipamentos.

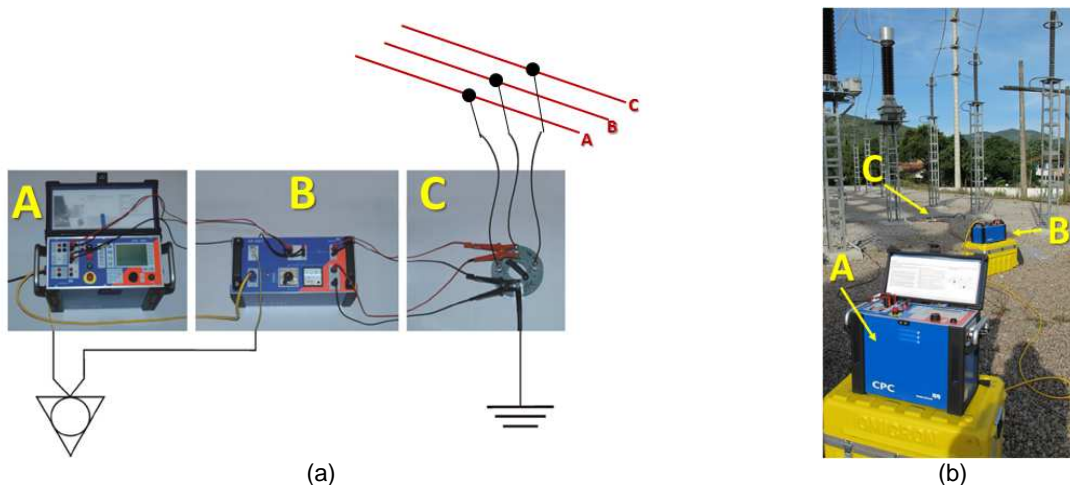


Figura 9. Disposição dos equipamentos em campo para medida: (a) Esquema de conexão; (b) Equipamentos de medida conectados na subestação.

Conforme descrito anteriormente, foram realizadas medidas monofásicas, bifásicas e trifásicas na linha de transmissão. Para exemplificar as medidas realizadas, a tabela 1 mostra os resultados das medidas realizadas na fase C para terra (CN) e a tabela 2 mostra os resultados para medida bifásica AB.

Tabela 1 – Resultados de medidas na fase CN

Medida	Frequência	I [A]		V [V]		R [Ω]	X [Ω]
1	40,0Hz	10,0503A	0,0°	108,0249V	71,55°	3,40159523 Ω	10,195857 Ω
2	40,0Hz	10,0511A	0,0°	108,0366V	71,54°	3,4034724 Ω	10,19555583 Ω
3	80,0Hz	10,0493A	0,0°	201,5662V	78,35°	4,05035266 Ω	19,64472953 Ω
4	80,0Hz	10,0482A	0,0°	201,5423V	78,36°	4,04676626 Ω	19,64467064 Ω
5	100,0Hz	10,0356A	0,0°	248,0372V	79,88°	4,34281046 Ω	24,3312023 Ω

Tabela 2 – Resultados de medidas na fase AB

Medida	Frequência	I [A]		V [V]		R [Ω]	X [Ω]
1	40,0Hz	10,0522A	0,0°	127,0129V	71,09°	4,09497242 Ω	11,9536274 Ω
2	40,0Hz	10,0522A	0,0°	127,0145V	71,09°	4,09486106 Ω	11,95330233 Ω
3	80,0Hz	10,0448A	0,0°	243,5409V	80,13°	4,15599546 Ω	23,88661825 Ω
4	80,0Hz	10,0439A	0,0°	243,5232V	80,13°	4,15602441 Ω	23,88678465 Ω
5	100,0Hz	10,036A	0,0°	302,5724V	81,98°	4,20630993 Ω	29,85383308 Ω

Pode-se observar que as medidas foram realizadas nas frequências de 40, 80 e 100 Hz para eliminar a influência do sinal na frequência da linha de transmissão testada. Na figura 10a tem-se o gráfico dos dados mostrados na tabela 1, com a determinação da resistência e reatância na frequência de 60 Hz através da interpolação da curva de impedância pela frequência. Da mesma forma a figura 10b mostra o gráfico dos dados mostrados na tabela 2.

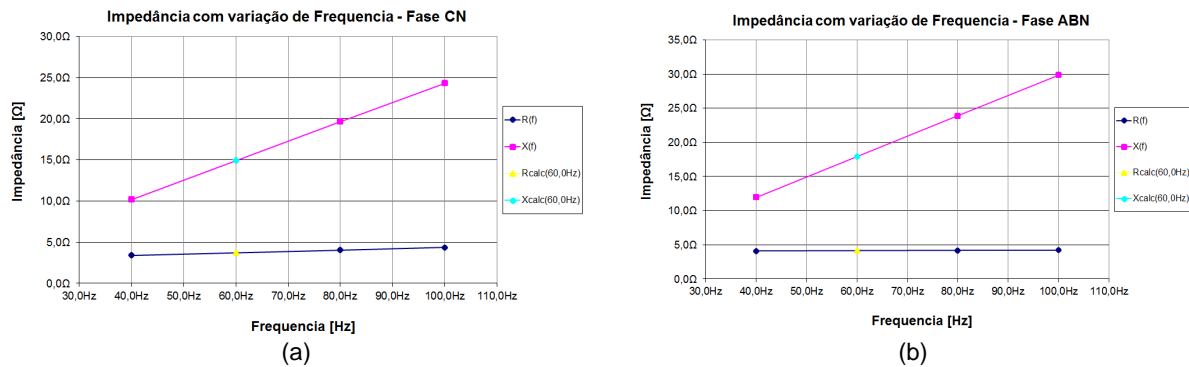


Figura 10. Medidas realizadas – representação gráfica da impedância com a variação de frequência: (a) Medida para fase C para terra (CN); (b) Medida para medida bifásica AB;

Assim, o cálculo das impedâncias da linha de transmissão testada e o fator de terra K_0 foram determinados de forma automática em uma planilha previamente preparada. A figuras 11 mostra os resultados obtidos.

Medidas:	R [Ω]	X [Ω]	Z [Ω]	Phi (°)
L1-L2: $Z_{L1} + Z_{L2}$	4,077	17,920	18,378	77,18°
L2-L3: $Z_{L2} + Z_{L3}$	4,067	18,080	18,532	77,32°
L3-L1: $Z_{L3} + Z_{L1}$	4,111	19,959	20,378	78,36°
L1-E: $Z_{L1} + Z_E$	3,949	13,966	14,513	74,21°
L2-E: $Z_{L2} + Z_E$	3,758	14,551	15,028	75,52°
L3-E: $Z_{L3} + Z_E$	3,681	14,920	15,368	76,14°
L1L2L3-E: $Z_{L1}/Z_{L2}/Z_{L3} + Z_E$	2,448	8,243	8,599	73,46°
Resultados de Impedância:	R [Ω]	X [Ω]	Z [Ω]	Phi (°)
Impedância sequência positiva Z_1	2,043	9,327	9,548	77,65°
Impedância sequência zero Z_0	7,343	24,730	25,797	73,46°

Fator de Compensação Residual (Fator de Terra)	$k_L = Z_E / Z_L$	k_L [1]	Phi (°)
		0,569	-6,64°

R_E / R_L e X_E / X_L	R_E/R_L [1]	X_E/X_L [1]
	0,865	0,551

$k_0 = Z_0 / Z_1$	k_0 [1]	Phi (°)
	2,702	-4,19°

Figura 11. Parâmetros da linha de transmissão obtidos e Fator de Terra calculado.

6.0 - CONCLUSÃO

A medida em campo da impedância da linha de transmissão e da impedância do loop de falta é a melhor maneira de assegurar que os ajustes dos relés de proteção sejam realizados de forma adequada. A utilização de uma frequência diferente da frequência fundamental possibilita eliminar todas as interferências causadas pelos sistemas e permite também a realização de um ensaio com maior nível de segurança, uma vez que a corrente injetada não precisa ser de alta intensidade.

O trabalho descreveu os procedimentos de teste e mostrou os resultados de medida realizada em uma linha de transmissão de uma empresa de distribuição de energia elétrica e a comparação dos resultados medidos com simulações onde verificou-se que há uma variação muito baixa da resistência e indutância interna na faixa de 40 a 100Hz, sendo possível, desta forma, linearizar tais valores encontrados. Assim, se focarmos nossa análise na faixa de frequência das medidas realizadas pelos procedimentos descritos neste trabalho, ou seja, de 40 a 100 Hz, podemos concluir que:

- A variação da Indutância total é linear nesta faixa de frequência, e consequentemente a variação da reatância também será.
- A variação da resistência total nesta faixa de frequência tem gradiente praticamente constante, portanto podemos considerar uma variação linear.

Isto valida e comprova os procedimentos descritos

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Paulino M. E. C.: “Emprego de Resposta em Frequência na Avaliação de Aterramento de Subestações Energizadas e Medida de Impedâncias de Linhas de Transmissão”. VII WORKSPOT - Workshop internacional sobre transformadores de potência, equipamentos, subestações e materiais, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- (2) Paulino M. E. C., Krueger M.: “Utilização de Nova Tecnologia para Medida de Valores de Impedância de Linhas Aéreas: Interferência Eletromagnética entre Linhas e Cabos Aéreos e Impedância de Terra em Subestações”. Apresentação no III Workshop sobre Novas Tecnologias e Métodos Aplicáveis à Manutenção da Transmissão - ABRATE, Belo Horizonte, Brasil, 2004.

- (3) Gutiérrez M.: "Medición de la Impedância de Línea y Tierra para una Correcta Estimación del Factor de Tierra (K0) en Líneas de Transmisión y Mejora de la Confiabilidad de la Protección de Distancia", PACW, Florianópolis, Brasil, 2012.
- (4) Hensler Th., Kaufmann R., Klapper U., Krüger M., Schreiner Z., 2003, III Workshop sobre "Novas Tecnologias e Métodos Aplicáveis à Manutenção da Transmissão "Portable testing device", US Patent 6608493
- (5) Kaiser S.: "Different Representation of the Earth Impedance Matching in Distance Protection Relays". Proceedings OMICRON User Conference Germany 2004"
- (6) Zanetta L.C.Z.: "Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência", Editora USP, 2003.
- (7) Monticelli A., Garcia A.: "Introdução a Sistemas de Energia Elétrica" Editora Unicamp, 2013.
- (8) Fucks, R.D.: "Transmissão de Energia Elétrica" Livros Técnicos e Científicos Ed., S.A., 1979.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino é Engenheiro Eletricista e Especialista em Manutenção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá/MG. Membro ativo de sociedades profissionais nacionais e internacionais. Como Cigré e ABNT/CB-03 – COBEI (Comitê Brasileiro de Eletricidade). Representante brasileiro no TC57 da IEC. Autor e coautor de mais de 100 trabalhos técnicos em eventos no Brasil e no exterior. Professor convidado em diversos cursos de pós-graduação. Atualmente é gerente técnico da Adimarco, no Rio de Janeiro. (marcelo@adimarco.com.br; mecpaulino@yahoo.com.br)



Rafael de Oliveira Fernandes é Engenheiro Eletricista em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá/MG e Mestrando em Sistemas de Potência pela Unicamp/SP. Trabalhou nos últimos anos na área de sistemas de proteção elétrica, sendo certificado pela Siemens Nuremberg/Alemanha em 2012, como Expert em Relés de Proteção da família Siprotec. Atualmente é engenheiro de estudos elétricos na GE Energy Consulting, coordenador da comissão de estudos do Cobei e membro internacional da IEC TC95-MT04 - Funções de Proteção e Guias de Aplicação. (rafaeldeoliveira.fernandes@ge.com; raf.ofern@gmail.com)