



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica  
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro  
Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

<b>Dilney C. Bitencourt P. Jr</b>	<b>Marcelo E. de C. Paulino</b>
<b>CELESC Distribuição S.A.</b>	<b>Adimarco Representações e Serviços Ltda</b>
dilneybp@celesc.com.br	marcelo@adimarco.com.br

**Experiência da Celesc Distribuição nas Medições de Resistência de Aterramento em Subestações Energizadas Utilizando Variação de Frequência**

**Palavras-chave**

Eletrodo  
Ensaio  
Malha de Terra  
Resistência de Aterramento  
Variação de Frequência

**Resumo**

Para a medição 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.

**1. Introdução**

A avaliação da condição do aterramento de subestações de média e alta tensão tem sido cada vez mais importante. Algumas técnicas para avaliação das malhas de terra já são utilizadas a vários anos. Porém são técnicas que preveem a realização dos testes com a instalação desenergizada.

Com a implantação do novo modelo e de novas regras para o setor elétrico brasileiro, dentre elas, os contratos de concessão que penalizam a indisponibilidade das instalações (parcela variável) e as exigências da norma NR 10 nos itens 10.2.3 e 10.2.4, que cobram a responsabilidade das Empresas de avaliarem o estado das malhas de terra de suas Subestações, foi necessário repensar a metodologia para os testes de

avaliação das malhas de terra, considerando agora a hipótese de realizar os trabalhos sem a necessidade de desligamentos dos ativos. Desta forma é promovida a diminuição da indisponibilidade dos ativos e a adaptação e otimização dos recursos necessários para a execução dos ensaios, priorizando a segurança das pessoas e das instalações.

Devido o envelhecimento das instalações e a diminuição do número de profissionais envolvidos com a avaliação dos equipamentos na subestação, torna-se imperativo a busca de procedimentos e ferramentas que possibilitem a obtenção de dados das instalações de forma rápida e precisa.

Este trabalho mostra técnicas de avaliação e testes de aterramento de subestações energizadas utilizando varredura de frequências. Mostra as definições de aterramento e apresenta métodos consagrados de teste, mas agora com a aplicação variação de frequência nos testes.

O trabalho também apresenta alguns resultados de avaliações realizadas em subestações da Celesc Distribuição S.A. Estas subestações são de pequeno porte, com diagonais de até 100 metros de comprimento. Os resultados são comparados com os ensaios antes e depois da energização da instalação. Outros ensaios mostram a eficiência do método utilizando frequência diferente da fundamental em instalações com muita interferência e a impossibilidade de fazer estes ensaios utilizando-se o método convencional.

## **2. Desenvolvimento**

### ***2.1 Considerações sobre Aterramento***

Define-se aterramento como a ligação intencional de parte eletricamente condutiva à terra, através de um condutor elétrico e sistema de aterramento como o conjunto de todos os eletrodos e condutores de aterramento, interligados ou não, assim como partes metálicas que atuam direta ou indiretamente com a função de aterramento, tais como: cabos para-raios, torres e pórticos, armaduras de edificações, capas metálicas de cabos, tubulações e outros.

Considera-se um sistema aterrado quando o sistema ou parte de um sistema elétrico cujo neutro é permanentemente ligado à massa condutora de terra, ou seja, conectado ao sistema de aterramento ao qual são ligadas as partes metálicas do equipamento ou da instalação que, normalmente, não ficam sob tensão (ABNT, 2009).

Além de diversas bibliografias relacionadas ao termo aterramento, um grande número de profissionais do sistema de energia elétrica oferecem várias definições. Podemos dizer então que aterramento refere-se a terra propriamente dita ou uma grande massa que se utiliza em seu lugar. Quando dizemos que algo está “aterrado”, queremos dizer então que, pelo menos, um de seus elementos está propositalmente ligado a terra (Moreno, 1999).

O aterramento é constituído basicamente de três componentes: os eletrodos de aterramento, as conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos e solo em torno dos eletrodos. A Figura 1 mostra uma representação de um eletrodo colocado no solo e as linhas equipotenciais em torno dele e sua esfera de influência.

Esses eletrodos de aterramento são constituídos geralmente de qualquer elemento de metal enterrado no solo, por exemplo, hastes de cobre ou aço cobreado, malhas de condutores de cobre ou sistemas hidráulico com canos condutores. As hastes verticais são mais comuns. Mesmo nos sistemas reticulados de malhas de aterramento, são utilizados hastes, principalmente se as camadas com menor resistividades estiverem mais profundas (Visacro, 2002).

A avaliação de um aterramento é realizada pela capacidade de condução da corrente para terra, ou seja, a impedância é o modo de como o sistema enxerga o aterramento.

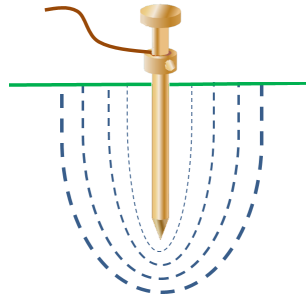


Figura 1- Representação de um eletrodo colocado no solo.

Para se avaliar a natureza dos aterramentos, deve ser considerado que, em geral, uma conexão a terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para terra. A impedância é a maneira na qual o sistema enxerga o aterramento. Esta impedância, denominada Impedância de Aterramento, pode ser conceituada como a oposição oferecida pelo solo à injeção de corrente elétrica no mesmo, através dos eletrodos, e se expressa quantitativamente por meio da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante.

## 2.2 Avaliação da Resistência de Aterramento

Os procedimentos e o tratamento da medida existente no caso de condutores metálicos lineares possui uma simplicidade que não deve ser aplicada no caso da medida da resistência de aterramento devido a geometria complexa apresentada pelos caminhos percorridos pela corrente elétrica. Essa corrente tende a se dispersar em todas as direções, com caminhos dependentes da característica do solo.

A resistência de aterramento (de um eletrodo) é definida como a relação da tensão medida entre o eletrodo e o terra remoto e a corrente injetada no eletrodo (ABNT, 2009). Para sua medida é utilizado o método da queda de potencial, inclusive para realização da medida da malha de terra em subestações energizadas.

Entretanto, em determinadas situações, a realização das medidas como método da queda de potencia é muito difícil ou mesmo impossível devido a:

- Realização de ensaios em instalações energizadas ou em locais próximos a grandes fontes geradoras de ruídos, como alimentadores ou linhas de transmissão. As medidas realizadas na frequência de 60 Hz recebem grande interferência das fontes externas e do próprio sistema medido energizado.
- Grande incerteza da medida em sistemas de aterramento com grandes dimensões. Essas instalações geralmente apresentam resistências de aterramento inferiores a 1[?] e a utilização de equipamentos de teste e acoplamentos de medidas com baixa sensibilidade pode comprometer os resultados obtidos.
- Necessidade de testes em locais densamente povoados, criando dificuldades para a instalação do cabeamento de teste nas distâncias adequadas para a confiabilidade da medição.

Este trabalho apresenta aplicações envolvendo novas tecnologias e novos equipamentos capazes de realizar

testes com maior rapidez e eficácia, eliminando interferências através da variação de frequência aplicada nos testes. Mostra através de resultados práticos a validade do método apresentado.

### 2.3 Medida da resistência de aterramento

A medida da resistência de aterramento é realizada com a utilização de uma fonte de corrente controlada e um circuito elétrico, composto de um ponto de injeção de corrente e um ponto de retorno dessa corrente. O ponto de injeção de corrente é definido e a corrente é injetada por meio do sistema de aterramento a ser medido. Pode ser um ponto de aterramento da instalação ou de um equipamento. O ponto de saída da corrente pode ser obtido através de um ponto de aterramento auxiliar, composto por uma ou mais hastes interligadas conforme a figura a seguir.

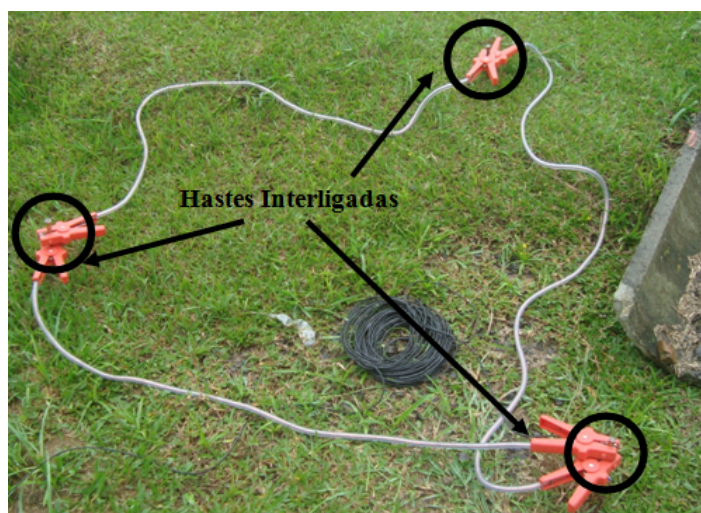


Figura 2 – Detalhe do eletrodo de corrente.

A determinação da resistência do aterramento é obtida pela razão da tensão medida entre o sistema de aterramento sob ensaio e o eletrodo de potencial e da corrente que flui entre o aterramento e o eletrodo auxiliar de corrente. Pela Lei de Ohm a resistência é calculada.

A distância entre o eletrodo auxiliar de corrente e o sistema de aterramento deve ser de no mínimo três vezes a maior dimensão (normalmente a diagonal) do sistema de aterramento a partir da periferia da malha. Quanto maior a distância do eletrodo de corrente, maiores são as chances de não haver sobreposição das regiões de influência da malha e do eletrodo (ABNT, 2009).

Com a fonte, injeta-se uma corrente na malha e através de um eletrodo auxiliar de tensão realizam-se as medições da diferença de potencial entre o eletrodo e a malha em várias distâncias ao redor da subestação.

A disposição do circuito é muito importante, principalmente a localização do eletrodo de tensão em relação ao eletrodo auxiliar. Esta disposição do circuito pode determinar o tipo de curva que será obtido da resistência em função da distância do sistema sob ensaio conforme gráfico mostrado na Figura 3.

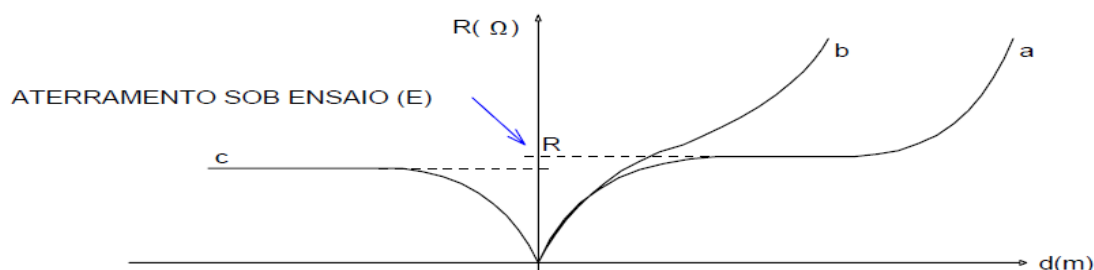


Figura 3 - Curvas de resistência em função da distância e posição dos eletrodos.

A curva “a” será obtida quando o eletrodo de potencial for deslocado em direção ao eletrodo de corrente, o aumento da resistência se deve a influência do eletrodo de corrente na região. Nesta curva é possível observar uma região de patamar bem definida, onde se obtêm a resistência da malha. A curva “b” não apresentou a região de patamar, pois o eletrodo de corrente foi posicionado de forma inadequada, neste caso deve ser reposicionado mais afastado da malha. Na curva “c” o eletrodo de potencial foi deslocado em direção diferente do eletrodo de corrente (ABNT, 2009).

Se possível, deve-se escolher os pontos de medida em um ângulo de  $90^\circ$  relativos à trajetória da corrente. A medida realizada próxima à trajetória de corrente, com um ângulo menor que  $60^\circ$ , deve ser evitada. Entretanto, recomenda-se, por questão de segurança, que a distância do eletrodo de tensão em relação ao eletrodo auxiliar não seja inferior a 40 [m] para pequenos aterramentos e a 100 [m] para teste de malhas de grandes sistemas (Tagg, 1964).

Recomendam-se também medições em diferentes distâncias. Os resultados devem ser semelhantes. Se os pontos forem dispostos próximos à subestação, ou próximo demais a outros sistemas de aterramento, ou sobre condutores enterrados, os resultados não são estáveis. A Figura 4 representa o sistema descrito.

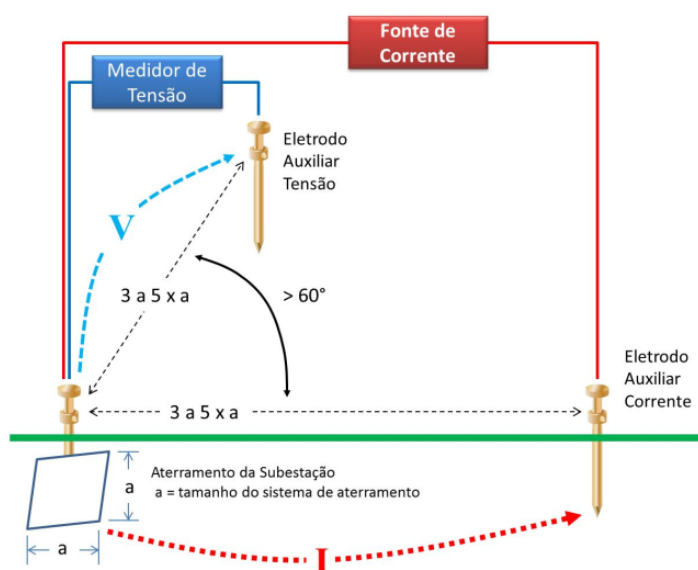


Figura 4 - Medida da resistência de aterramento de pequenos sistemas.

A resistência real do aterramento, para solos homogêneos, se dará quando o eletrodo de potencial, colocado aproximadamente 60% da distância entre o centro elétrico da malha e o eletrodo de corrente e em linha com estes, normalmente está na região do patamar. Este eletrodo tem sua localização gradativamente variada ao longo dessa direção, efetuando-se uma medição para cada posição, de forma a gerar uma curva semelhante à da Figura 5, da qual se obtêm o valor da resistência do aterramento (Beltani, 2007).

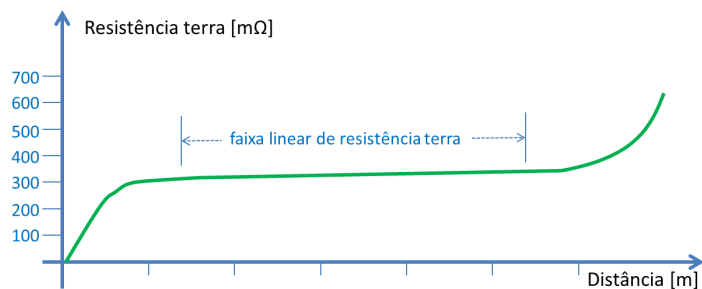


Figura 5 - Curva de Resistência de aterramento em função da distância.

Antes de iniciar os testes, para conferir se a corrente está sendo efetiva para a realização do ensaio, é

aconselhável fazer uma verificação da proporcionalidade entre a corrente injetada e a tensão medida, por exemplo, injetar uma determinada corrente na malha e medir a tensão dentro da mesma, a medida de tensão pode se realizada entre duas hastes distanciadas de um metro uma da outra dentro da malha de terra. Após a medição, dobrar a corrente injetada e medir a tensão novamente na mesma posição e a tensão deve dobrar também. Caso a proporcionalidade não seja mantida, é sinal de que tensão residual na malha de terra é muito elevada, e não será possível realizar uma medição confiável utilizando os procedimentos convencionais.

## **2.4 Sistema de Teste Utilizado**

Neste trabalho, todos os testes foram executados com um sistema completo de teste, o CPC100 da Omicron. O dispositivo possui de um Processador Digital de Sinal (DSP) que gera sinais senoidais numa faixa de frequência de 15 a 400 Hz alimentados através de um moderno amplificador de potência. Um transformador de saída combina a impedância interna do amplificador com a impedância do objeto sob teste. Realiza a grande maioria de teste em equipamentos de subestação. Por utilizar a frequência de teste diferente da frequência de linha e seus harmônicos, junto com medições usando técnicas de filtragem seletiva, o equipamento de teste pode ser operado em campo, até em subestações com altos distúrbios eletromagnéticos.



Figura 6 - Sistema de teste CPC100.

## **2.5 Estudos de Casos**

### **2.5.1. Comissionamento de Subestação de 138/13,8 kV de 27 MVA**

A subestação em questão apresenta uma potência instalada de 27 MVA com um transformador de 138/13,8 kV, possui duas linhas de 138 kV, um bay da alta do transformador e um bay de transferência de barras em 138 kV. Na baixa tensão, possui o bay da baixa do transformador e 4 alimentadores da saída, além de um banco de capacitores de 4,8 MVA. A maior diagonal da subestação mede aproximadamente 70 metros.

A medição de resistência foi realizada com a subestação desenergizada e totalmente desconectada do sistema. O eletrodo de corrente foi posicionado a uma distância de 3 vezes a maior diagonal da subestação, neste caso 210 metros aproximadamente.

O eletrodo de corrente foi formado por um conjunto de hastes cravadas no solo e interligadas entre si para diminuir a resistência de contato deste eletrodo com o solo, conforme mostrado na Figura 2. Este eletrodo foi conectado à malha de terra através de um cabo isolado com capacidade para transportar a corrente injetada, neste caso aproximadamente 1,3 Ampères.

Com a corrente circulando entre a malha de terra e o eletrodo auxiliar de corrente, utilizou-se um eletrodo auxiliar de tensão que para medir a queda de potencial entre a malha de terra e o eletrodo. A primeira medição foi realizada dentro do triângulo formado pelas 3 hastes, e as demais medições foram feitas em passos de 10 em 10 metros até chegar na subestação.

Como a subestação encontrava-se desenergizada, a corrente foi injetada na frequência de 60 Hz, obtendo-se os resultados para a resistência de aterramento mostrados na curva abaixo.

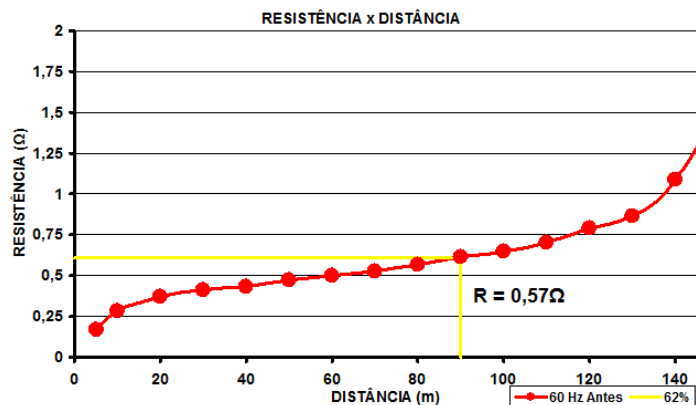


Figura 7 – Gráfico da resistência em função da distância do eletrodo de potencial.

Na curva acima, é possível observar claramente a região de patamar, onde os valores de resistência praticamente não variam. A resistência da malha de terra medida com a subestação desenergizada foi de 0,57? e o valor da resistência calculada para o projeto desta malha foi de 0,51?.

Com a energização da subestação, um novo ensaio foi realizado utilizando os mesmos procedimentos, mas desta vez, a corrente foi injetada em duas frequências, em 60 Hz e 70 Hz. O ensaio em 60 Hz foi repetido para verificar a interferência do sistema energizado nas medições. Os valores obtidos comparando todos os ensaios antes e depois da energização estão representados na Figura 8.

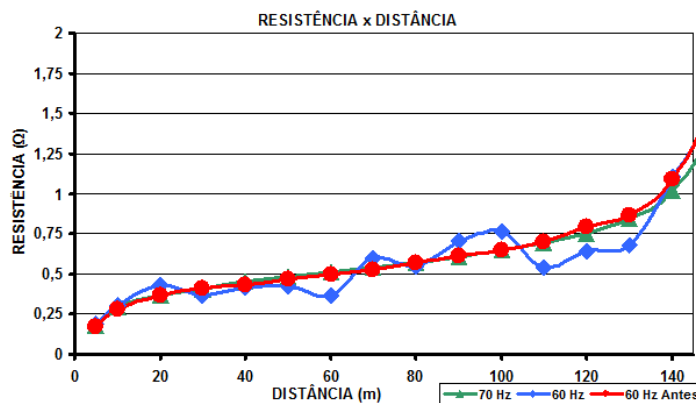


Figura 8 - Comparação entre os valores antes e depois da energização.

Podemos observar que as curvas em vermelho e em verde apresentam grande semelhança, mostrando que a utilização de uma fonte de injeção de corrente utilizando uma frequência fora da fundamental, não sofre interferência do sistema energizado que é o que ocorre com a curva azul. Vale ressaltar que a corrente utilizada foi de baixa intensidade, em torno de 1,3 Ampères.

### 2.5.2. Comissionamento de Subestação de 138/13,8 kV de 27 MVA

A subestação conta com um transformador de 138/13,8 kV de 27 MVA, possui duas linhas de 138 kV, um

bay da alta do transformador e um bay de transferência de barras em 138 kV. Possui ainda um bay de baixa do transformador e 4 alimentadores da saída, além de um banco de capacitores de 4,8 MVA. A maior diagonal da subestação mede aproximadamente 95 metros. O eletrodo de corrente foi posicionado a uma distância de aproximadamente a 270 metros através de cabos isolados e hastes interligadas.

A subestação estava desenergizada, mas por possuir muitas linhas e redes de distribuição ao seu redor, foi feito um teste para verificar a proporcionalidade entre a corrente e tensão, o teste consiste em medir a tensão entre duas hastes a um metro de distância uma da outra dentro da malha variando o valor da corrente. Os resultados estão representados na tabela abaixo.

Tabela 1 - Medida entre a proporcionalidade da tensão e corrente

Frequência (Hz)	Corrente (A)	Tensão (mV)
128	1,00	29,26
128	2,00	58,28
128	4,00	116,95
60	1,00	315,86
60	2,00	264,92
60	4,00	185,70

É possível verificar na tabela que com a injeção de corrente na frequência de 128 Hz a tensão se mantém proporcional ao aumento da corrente. Com a corrente injetada na frequência de 60 Hz o mesmo não ocorre. Mesmo com a subestação desenergizada, para realizar o ensaio utilizando os procedimentos convencionais, a fonte para a injeção de corrente deveria ter a capacidade de fornecimento de uma corrente muito maior, diminuindo o impacto causado pela corrente residual existente na malha, nos resultados das medições.

Os ensaios foram realizados injetando-se corrente na frequência de 128 Hz e o gráfico abaixo mostra os valores da resistência da malha deslocando o eletrodo de potencial em direção ao eletrodo de corrente e em direção contrária.

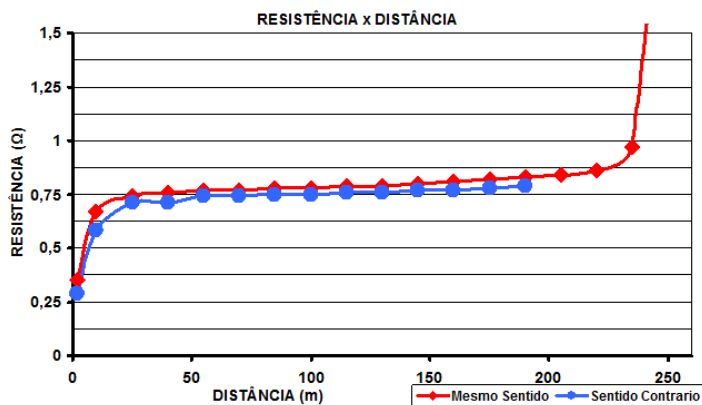


Figura 9 - Resistência em função da distância em 128 Hz.

Neste caso, foi possível confirmar as curvas mostradas nas Figuras 3 e 4, onde os valores de resistência são praticamente os mesmos, com uma pequena diferença para baixo nas medições no sentido contrário.

### 2.5.3 Avaliação de Subestação de 34,5/13,8 kV de 15 MVA

Esta subestação de distribuição começou a apresentar problemas de queima dos sistemas de controle dos religadores. Ela possui dois transformadores de 34,5/13,8 kV com 7,5 MVA cada, possui dois bancos reguladores de tensão e quatro alimentadores de 13,8 kV.

No ensaio de resistência, a maior diagonal da malha considerada foi de 40 metros. O eletrodo auxiliar de



corrente foi colocado a uma distância de aproximadamente 150 metros. A corrente injetada foi na ordem de 2,37A em 60 Hz e em 70 Hz. O ensaio foi realizado com a subestação energizada.

Os valores encontrados no ensaio com injeção de corrente em 70 Hz estão expostos no gráfico a seguir.

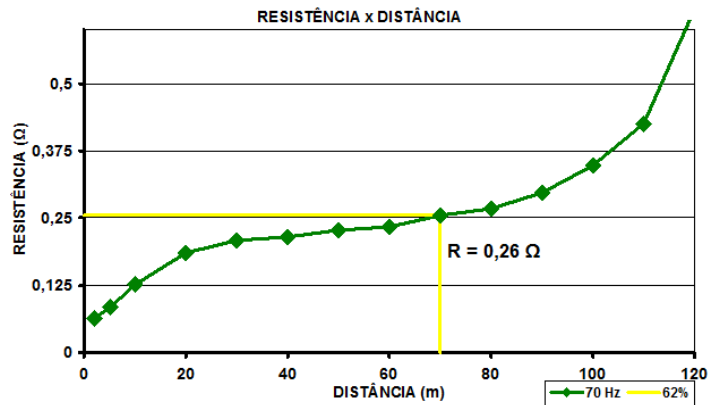


Figura 10 - Medição da resistência em 70 Hz.

Os ensaios realizados em 60 Hz são mostrados no gráfico abaixo apresentado a grande diferença entre as duas medições.

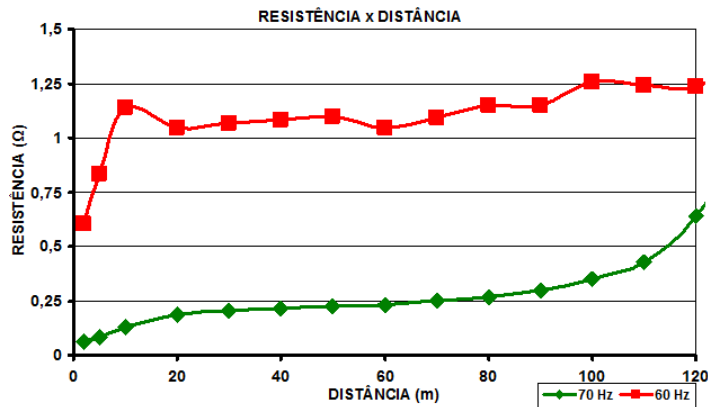


Figura 11 - Comparação entre as duas medições.

A diferença entre as duas medições se deve a grande interferência na medição com a frequência da rede. Os valores medidos de tensão apresentavam valores muito maiores, não correspondendo a corrente injetada. Isto se deve ao nível alto de corrente residual que circulam pela malha. Para que fosse possível medir a resistência neste caso, com a frequência em 60 Hz, seria necessário injetar um corrente muito maior na malha para que a corrente residual se tornasse insignificante para a medição. Esta não seria uma alternativa prática, uma vez que a fonte teria que ser mais robusta e os níveis de tensão utilizados no ensaio tornariam o procedimento menos seguro.

Como podemos observar nos ensaios de resistência, os valores encontrados são considerados muitos satisfatórios. Um fato que melhora muito o valor de resistência e em certos casos pode não mostrar o real estado da malha de terra é o tipo do material que compõem o solo e a umidade do mesmo. Neste caso, por exemplo, possui um rio passando ao lado da subestação, deixando o terreno muito umedecido.

Outro ensaio realizado para avaliar a integridade da malha de terra é o ensaio para verificação das conexões dos equipamentos. Uma fonte de corrente continua pode ser utilizada para realizar este ensaio ou um alicate terrômetro. Com este ensaio foi possível encontrar o motivo pelo qual os equipamentos estavam queimando constantemente, alguns equipamentos estavam mal aterrados ou desaterrados, provocando sua queima durante um surto de tensão ou chaveamento.

### 2.5.4 Avaliação de Subestação de 138/23 kV de 17 MVA

Esta instalação possui uma capacidade de distribuição de 17 MVA com um transformador de 138/23 kV. Possui também quatro linhas de transmissão de 138 kV, um bay da alta do transformador e um bay de transferência de barras em 138kV. Na baixa tensão, um bay da baixa do transformador e quatro alimentadores da saída, além de um banco de capacitores de 4,8MVA. A maior diagonal da subestação mede aproximadamente 80 metros.

A máxima distância que foi possível colocar o eletrodo auxiliar de corrente foi de 150 metros. Os resultados abaixo mostram que devido a este fato não foi possível definir um valor de resistência para a malha, uma vez que a região de patamar não ficou bem definida conforme figura abaixo.

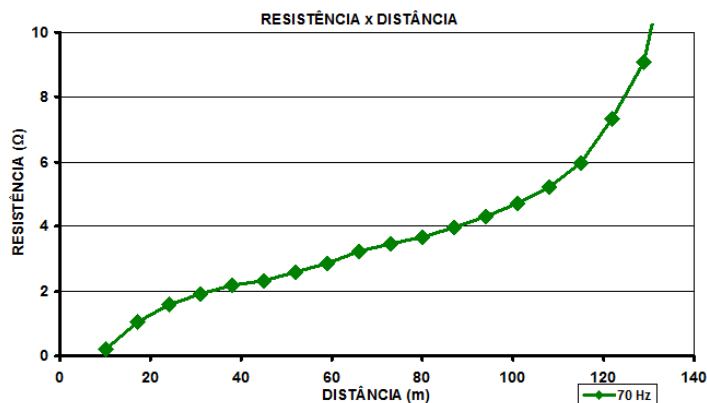


Figura 12 - Resistência pela distância sem definição da região de patamar.

Nestes casos, onde não é possível posicionar o eletrodo de corrente em uma distância adequada, devido a fatores como localização do terreno, diagonal muito grande da subestação, é possível utilizar uma linha de transmissão, ou o cabo de guarda de uma linha. Mas nestes casos o tratamento que deve ser dados com relação à segurança é o mesmo utilizado para serviços em linha viva.

Como comparação dos valores medidos com injeção de corrente em 60 Hz e 70 Hz, o gráfico abaixo mostra que nesta subestação é impossível realizar a medição na frequência da rede devido ao alto nível de interferência na malha.

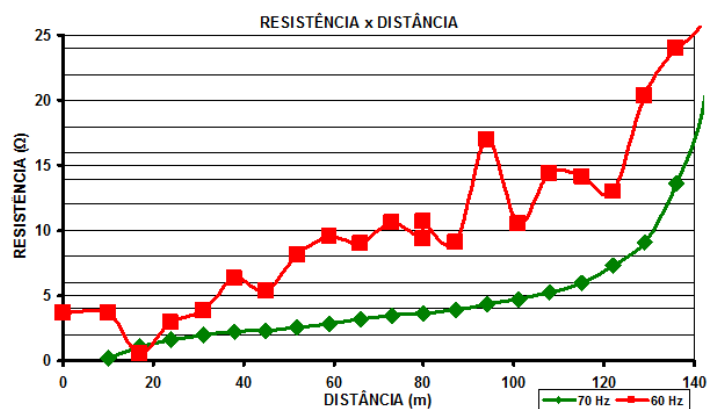


Figura 13 - Comparação entre medição em 60 e 70 Hz.

### 3. Conclusões

A utilização de fontes com possibilidade de variação de frequência diminui a intensidade da corrente de teste injetada quando comparada com o método convencional. A variação da frequência surge como uma alternativa para eliminar interferência presentes nos sistemas elétricos. A utilização de um equipamento de

alta tecnologia auxilia na execução dos ensaios tanto na geração dos sinais em frequências diferentes da fundamental como também nas medições realizadas de forma seletiva nas frequências definidas pelo operador. Desta forma provoca o aumento da confiabilidade dos resultados obtidos em campo e a possibilidade de fazer medições utilizando baixos níveis de corrente aumenta a segurança na execução dos ensaios.

#### **4. Referências bibliográficas**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15751 - Sistemas de aterramento de subestações — Requisitos. ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15749 – Medição de Resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. ABNT, 2009.

Beltani, J. M. Medição de malha de terra em subestações energizadas, Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2007.

Moreno, H.; Costa, P.F. Aterramento elétrico. São Paulo: Procobre, 1999. 39 p.

Visacro Filho, S. Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber, 2002. 159 p.

Tagg, G. F. Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-eletrode systems covering a large area. Proceedings IEE, New York, v. 3, n. 12, p. 2118-2130, 1964.

---