

CONCEMA

**Consultoria em Ciências, Engenharia, Gestão de Sistemas e Meio
Ambiente LTDA.**

**Relatório da Etapa 10 do Projeto “Avaliação de Sistemas de
Aterramento”
Referência projeto: PD-0039-0045/2011**

INTRODUÇÃO

Este relatório tem como meta descrever resultados da etapa 10 do projeto Avaliação de Sistemas de Aterramento.

Na versão desenvolvida até esta etapa, o sistema para determinação do número de hastes de aterramento (configuração do aterramento), faz uso de duas estacas auxiliares de retorno. Estas estacas auxiliares eram utilizadas para leitura da tensão e como referência do sistema. No entanto, durante a avaliação do sistema para determinação da configuração de aterramento em campo foi verificado que as estacas auxiliares inviabilizam a aplicação do sistema em certos casos.

Por exemplo, em um dos locais visitados para execução dos testes, a subestação no Bairro do Centro, verificou-se que a área onde estava o poste com o transformador aéreo estava cercada por concreto, como observado na Figura 1. Isto dificultou a fixação das estacas auxiliares utilizadas na mediação. Primeiramente, tentou-se fincar uma das estacas na via, mas o asfalto não permitiu. Desta maneira, foi utilizada uma picareta para tentar perfurar o passeio, o que causou um grande desgaste físico a equipe de mediação e danificou o passeio. Também foi utilizado uma furadeira de alto impacto, o que permitiu atravessar o concreto do passeio após ± 30 cm perfurados e atingir o solo para fixação da estaca.



Figura 1. Poste da subestação Centro

O sinal obtido pelo sistema de aquisição foi inconclusivo, possivelmente devido ainda haver uma segunda camada de brita isolando os eletrodos/estacas do solo.

Devido às reais dificuldades encontradas na implementação da metodologia anterior, a etapa 10 do projeto teve como objetivo o desenvolvimento de uma nova metodologia que permitisse o ensaio sem a

necessidade da utilização das estacas auxiliares. Tendo em vista que em grande parte do comissionamento ocorrerá em locais semelhantes aos visitados anteriormente.

O método de teste sem estacas elimina a necessidade de encontrar locais adequados para colocar estacas de terra auxiliares. Isto poupa tempo e permite a realização do comissionamento em locais onde não é possível recorrer a técnicas que utiliza as estacas auxiliares, incluindo no interior de edifícios e áreas muito urbanizadas.

Na nova metodologia o loop de terra foi utilizado para o retorno da corrente. A Figura 2a exibe de forma simplificada a distribuição de um sistema de aterramento. O circuito equivalente desse sistema é representado na figura 2b, em conjunto com a nova metodologia.

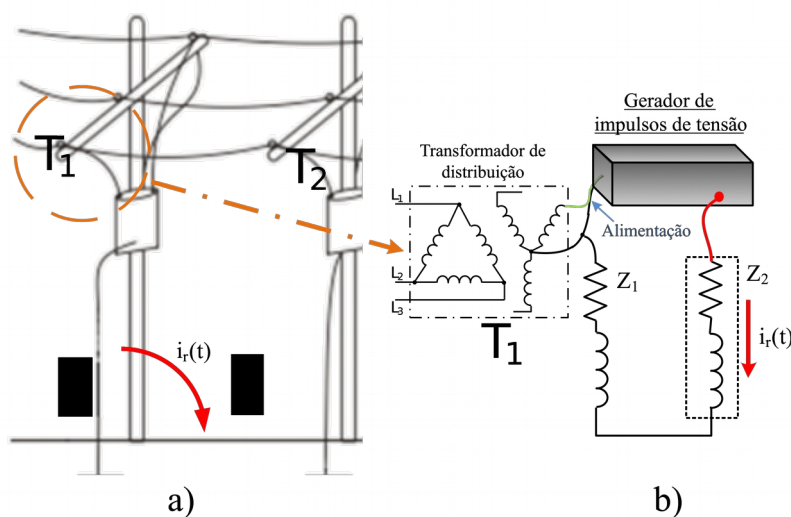


Figura 2. a) Forma simplificada do aterramento de um sistema de distribuição b) circuito equivalente.

Na nova metodologia a pinça de injeção de sinal será colocada na caixa de inspeção do sistema de aterramento a ser testado, aplicando o sinal de tensão, Figura 2b. A corrente produzida fluirá através do sistema de aterramento e retornando pelo neutro aterrado de onde o sistema é alimentado. Sendo assim é possível medir a corrente utilizando os sensores de corrente do sistema de avaliação de aterramento. A corrente medida será analisada (transitório, decaimento, FFT), sendo possível a identificação da topologia do sistema de aterramento instalado sem a necessidade de trabalhos mecânicos para encontrar a topologia enterrada.

METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta é composta de três passos obrigatórios: a definição dos dados coletados, a definição dos dados para o treinamento do algoritmo inteligente e a definição do modelo a ser utilizado. O sistema proposto pode avaliar qualquer topologia de aterramento se os passos descritos anteriormente forem devidamente seguidos. A metodologia proposta é ilustrada na Figura 3.

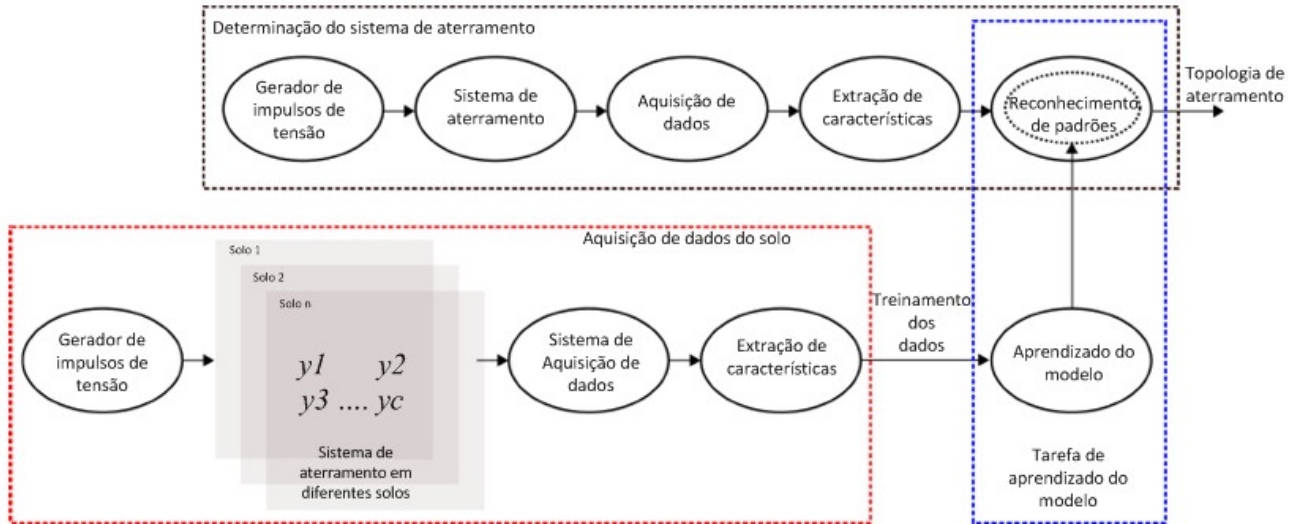


Figura 3. Metodologia proposta para a determinação do sistema de aterramento

Todos os passos possuem em comum quatro etapas: o gerador de impulsos de tensão, o sistema de aquisição de dados, o sistema de extração de variáveis/características, e por último o sistema de aprendizado e reconhecimento de padrões.

A. Gerador de impulsos de tensão

O sistema de excitação é responsável por injetar no sistema de aterramento uma corrente impulsiva através da descarga de um capacitor nos eletrodos enterrados. O capacitor é carregado até aproximadamente 1000 V e em seguida é descarregado no sistema de aterramento. A resposta transiente do sistema de aterramento é semelhante a uma descarga atmosférica. O gerador de impulsos de tensão desenvolvido é mostrado na Figura 4. Este circuito gera uma forma de onda semelhante a uma descarga atmosférica. O circuito eletrônico apresentado na Figura 4 pode ser descrito em duas etapas.

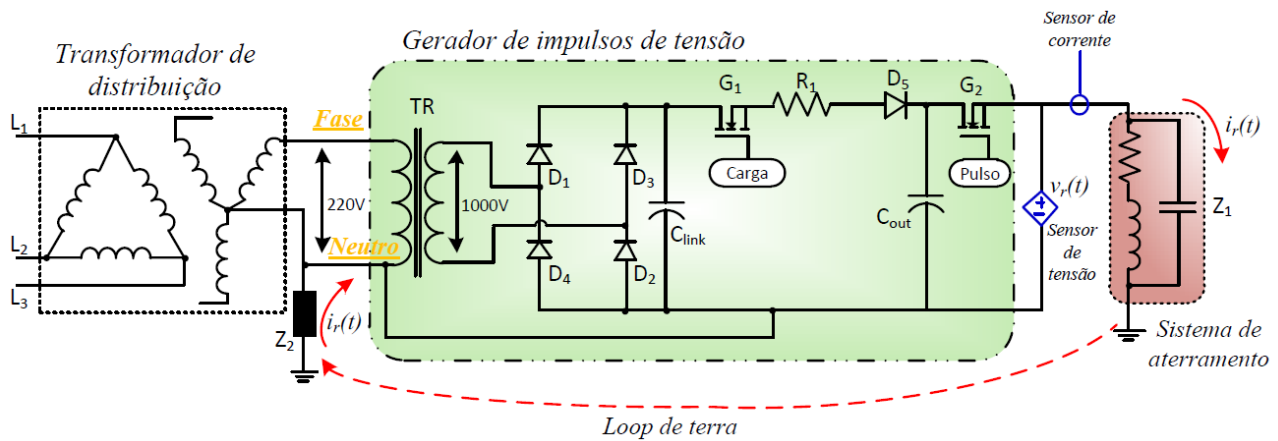


Figura 4. Circuito proposto e formação do loop de terra.

A primeira etapa consiste na carga do capacitor C_{out} e a segunda etapa é a descarga do capacitor C_{out} no sistema de aterramento. Na primeira etapa, a chave G_1 é fechada e a chave G_2 é mantida aberta. O

transformador TR eleva a tensão de entrada de 220Vrms para aproximadamente 700Vrms(1kV pico). Então, após a ponte retificadora o capacitor C_{link} permanece carregado. O resistor R_1 é utilizado para limitar a corrente de carga para o capacitor C_{out} . Na segunda etapa a chave G_1 é aberta e então a chave G_2 é simultaneamente fechada, assim a tensão do capacitor é aplicada ao aterramento. Como a impedância do solo é imprevisível, pode se concluir que os parâmetros do tempo de subida e descida (características da descarga atmosférica) são totalmente dependentes das condições do solo em análise.

B. Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é responsável em definir e adquirir a os dados da resposta após a aplicação do impulso de tensão. Como a impedância do solo é imprevisível, pode se concluir que os parâmetros do tempo de subida e descida são totalmente dependentes das condições do solo em análise. A partir da injeção do sinal de tensão duas respostas são amostradas. A primeiro é o sinal da resposta de tensão, $v_r(t)$, e a segunda é o sinal da resposta de corrente, $i_r(t)$. Estes sinais são coletados através de dois sensores (tensão e corrente).

Para a leitura de corrente foi utilizado o loop de terra, ou seja, o sinal é injetado no aterramento em análise e então a corrente circula retornando pelo neutro do secundário do transformador que está conectado ao o gerador de impulsos de tensão, como visto na Figura 4.

Como é possível observar, a nova metodologia não utiliza estacas auxiliares eliminando a necessidade de encontrar locais adequados para colocar estacas de terra auxiliares para o retorno de corrente. Tais locais incluem o interior de edifícios e áreas muito urbanizadas.

De forma resumida, a função do sistema de aquisição de dados é descrito de forma cronologia a seguir. A pinça de injeção de sinal é presa na haste que se localiza dentro da caixa de inspeção do sistema de aterramento a ser testado, aplicando-se então o sinal de tensão. A corrente produzida fluirá através do sistema de aterramento e retornando pelo ponto central da estrela (neutro) do transformado que comumente é aterrada. Sendo assim é possível medir a corrente utilizando os sensores de corrente do sistema de avaliação de aterramento, como visto na Figura 4. A corrente medida será então analisada (transitório, tempo de decaimento, harmônicos), sendo possível a identificação da topologia do sistema de aterramento instalado sem a necessidade de trabalhos mecânicos para encontrar a topologia enterrada. O transiente de tensão e corrente contém as informações necessárias para discriminar as diferentes topologias de aterramento, acontece na ordem de micro segundos. Para poder captar estas informações, foi utilizado um sistema de aquisição de dados U2531A da Agilent que possui uma taxa de amostragem de 2MSa/s.

C. Sistema de extração de características

Após a aquisição das respostas de tensão $v_r(t)$ e da corrente $i_r(t)$ pelo sistema de aquisição de dados, é calculada então no domínio do tempo a impedância de transiente, dado por:

$$z_r \approx \frac{v_r(t)}{i_r(t)}$$

O tempo transiente ocorre nos primeiros 125 μ s, que equivalem as primeiras 150 amostras. Para extrair as informações relevantes neste sinal de resposta é utilizado a transformada rápida de Fourier (FFT) em $z_r(t)$ para $t=1, \dots, 250$. Devido às características simétricas da FFT somente as primeiras 125 harmônicas são consideradas como características importantes que alimentarão a entrada do modelo do classificador.

A escolha do sinal do FFT para a extração das características foi motivada pela necessidade de retirar informações relevantes do sinal de impedância $z_r(t)$. A FFT também extrai a magnitude de cada harmônico da impedância de transiente. Assim foi assumido que cada topologia de aterramento possui seu próprio sinal de resposta padrão/comportamento, mesmo que em instalado em diferentes solos em diversas condições climáticas. Sendo assim o algoritmo inteligente é capaz de reconhecer este padrão de resposta da impedância de transiente.

D. Sistema de aprendizado e reconhecimento de padrões

Existem diversos meios de compor um modelo $h(\cdot)$ utilizado em um sistema de reconhecimento de padrões. Entretanto, este artigo não trata desta abordagem, ele ficará limitado ao estado da arte de cada classificador: *AdaBoost* (*adaptive boosting*), modelos de máquina de vetor de suporte (*support vector machine*) e árvores randomizadas (*random forest*). A escolha destes classificadores foi motivada pela característica do conjunto de dados de treino, que tem poucas amostras com um número grande de variáveis de entrada.

O AdaBoost opera chamando um classificador fraco repetidamente em iterações $t = 1, \dots, T$. Para cada chamada a distribuição de pesos D_T é atualizada para indicar a importância do exemplo no conjunto de dados usado para classificação. A cada iteração os pesos de cada exemplo classificado incorretamente é aumentado (ou alternativamente, os pesos classificados corretamente são decrementados), para que então o novo classificador foque nos exemplos mais mal classificados.

As árvores de decisão foram selecionadas por serem excelentes preditores. As árvores randomizadas (AR) são uma extensão mais robusta das árvores de decisão. As árvores randomizadas são compostas de B árvores de decisão. Cada árvore de decisão utiliza um conjunto de dados e variáveis diferentes, selecionados randomicamente a partir dos dados de entrada. As árvores randomizadas utilizam técnicas de chamada de *bagging*, *ensemble* and *randomizing*, o que faz das árvores randomizadas um classificador robusto a um número grande dados de entrada e poucas amostras. O

As máquinas de vetor de suporte é uma técnica baseada na teoria de aprendizado estatístico. Usualmente os valores alcançados pelas máquinas de vetor de suporte (MVS) são comparáveis ou superiores com o estado da arte. As máquinas de vetor de suporte são classificadores muito robustos na presença de poucas amostras e muitas variáveis de entrada, devido à utilização do aprendizado com regularização.

E. Passos obrigatórias

Neste tópico os passos obrigatórios para compor o sistema proposto serão descritos.

1. Definição dos dados para o treinamento:

Este passo é responsável pela coleta de dados e pela definição dos dados utilizados no treinamento do modelo. A coleção de dados é feita definindo-se os solos que serão utilizados para extrair as características das diversas topologias de aterramento. Neste momento é necessário utilizar a maior quantidade possível de ensaios em diferentes tipos de solos e em diversas condições climáticas. Então, o ensaio procedeu-se instalando diversas topologias de sistema de aterramento em diferentes tipos de solo. Adicionalmente, deve-se seguir estritamente a norma de instalação do aterramento e os procedimentos de ensaio para que os dados para o treinamento do modelo seja o melhor possível.

2. Definição do modelo

Este passo utiliza o reconhecimento de padrões e os sistemas de aprendizado. Sendo este passo responsável pela definição do modelo utilizado no reconhecimento de padrões que será utilizado para avaliar o sistema de aterramento. Para isso, qualquer modelo pode ser ajustado utilizando os dados de treinamento amostrados nos ensaios. O modelo que nos der o melhor resultado deverá ser utilizado como modelo final.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os testes com o gerador de impulsos de tensão foram realizados em diversas localidades da região metropolitana de Fortaleza, totalizando um total de 26 experimentos. Quatro topologias de sistemas de aterramento que são muito utilizadas pelas concessionárias de energia elétrica foram ensaiadas:

- Haste vertical única;
- 02 hastes verticais paralelas;
- 03 hastes verticais paralelas;
- 04 hastes verticais paralelas.

No total 104 respostas de tensão e corrente foram adquiridas. Como descrito na introdução, o objetivo do método proposto é detectar a instalação incorreta de um sistema de aterramento. O software desenvolvido possui a habilidade de determinar dentre as diversas topologias a topologia exata instalada no solo. Figura 5 representa a metodologia dos ensaios de campo.

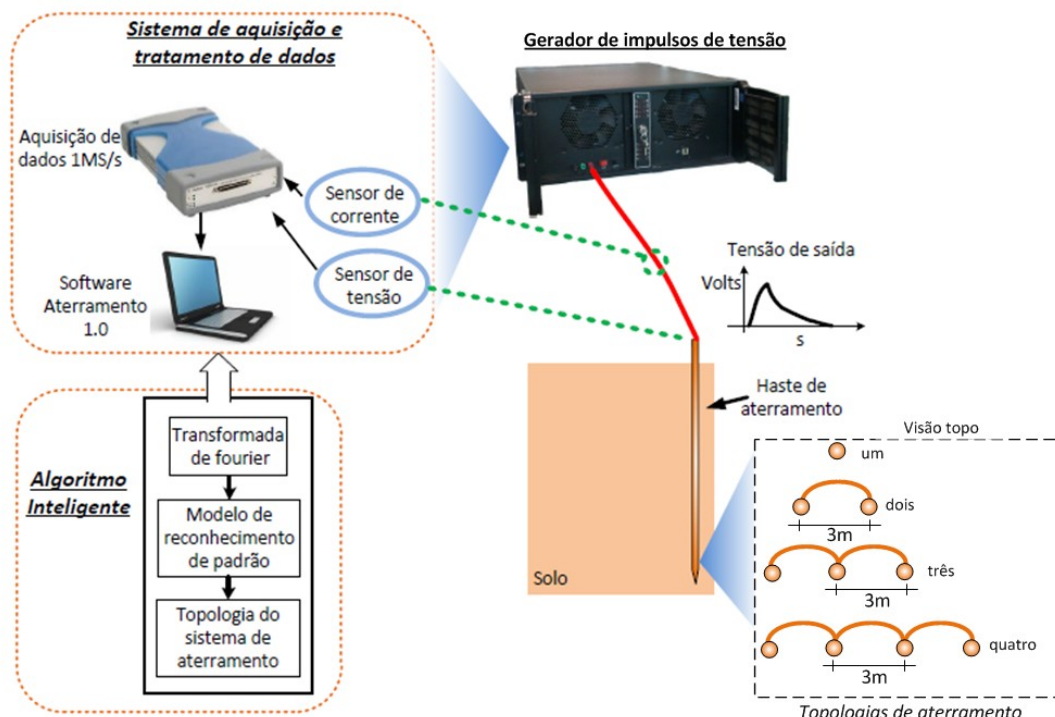


Figura 5. Metodologia proposta para a determinação do sistema de aterramento

O gerador de impulsos aplica uma tensão na haste, que representa a topologia do sistema de aterramento instalado no sistema de distribuição. O potencial e a corrente então são medidos pelos sensores. O sistema de aquisição de dados capta as formas de onda através dos sensores de corrente e tensão e as envia ao software desenvolvido na plataforma Python, que exibe e salva em um banco de dados todas as formas de onda medidas durante o ensaio. O software também analisa e emite como resultado a topologia do sistema de aterramento que foi inspecionado.

Para determinar a precisão da metodologia proposta, foi feito um rodízio entre 26 ensaios. Assim, 25 deles foram utilizados no treinamento do modelo para o reconhecimento de padrões e o ensaio que não foi utilizado durante o treinamento é utilizado para avaliar a precisão da predição do modelo final obtido. Desta forma, o mesmo procedimento foi repetido diversas vezes, de forma que todos os ensaios foram testados na validação do modelo. Este método simula uma situação real, onde nós não teríamos nenhuma informação do solo onde está instalado o sistema de aterramento a ser ensaiado. Este método usado na validação é mostrado na Figura 6.

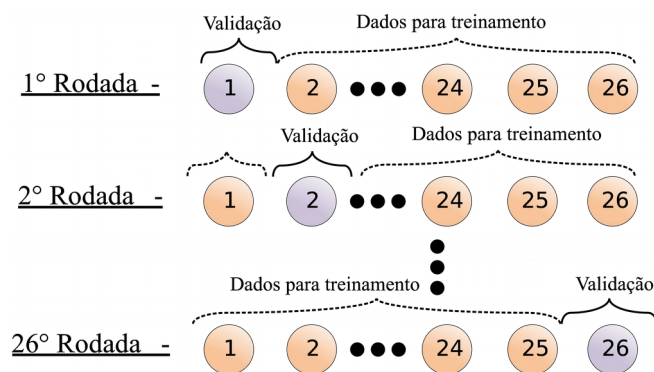


Figura 6. Representação do treino e estratégia de validação adotada.

Como explicado nos tópicos anteriores, três modelos foram treinados (Adaboost, AR, MVS). Os resultados apresentados em forma de taxa de acerto são mostrados na Tabela 1. A tabela mostra a taxa de acerto e os erros para cada topologia de aterramento. A linha diagonal da Tabela 1 corresponde à taxa de acerto. Pela Tabela 1, o modelo de floresta randomizadas e o modelo MSV foram os melhores, obtendo uma taxa de acerto de 97,9% de acerto (média dos valores da diagonal). Na prática estes modelos conseguiram identificar corretamente 97 dos 100 ensaios realizados. O modelo Adaboost apresentou 96,4% de acerto.

Tabela 1. Taxa de acerto para os modelos AR, Adaboost e MSV.

AR		Saída do modelo proposto			
Topologia real		1 haste	2 hastes	3 hastes	4 hastes
	1 haste	100%	0%	0%	0%
	2 hastes	2,9%	97,1%	0%	0%
	3 hastes	0%	2,9%	97,1%	0%
	4 hastes	0%	2,9%	0%	97,1%
Taxa de acerto		97,9%			
Adaboost		Saída do modelo proposto			
Topologia real		1 haste	2 hastes	3 hastes	4 hastes
	1 haste	97,1%	2,9%	0%	0%
	2 hastes	2,9%	97,1%	0%	0%
	3 hastes	0%	2,9%	97,1%	0%
	4 hastes	0%	2,9%	2,9%	94,3%
Taxa de acerto		96,4%			
MSV		Saída do modelo proposto			
Topologia real		1 haste	2 hastes	3 hastes	4 hastes
	1 haste	97,1%	2,0%	0%	0%
	2 hastes	0%	97,1%	2,9%	0%
	3 hastes	0%	0%	97,1%	2,9%
	4 hastes	0%	0%	0%	100%
Taxa de acerto		97,9%			

Pelos índices apresentados na Tabela 1 observa-se que se obteve um índice de acerto foi alto, com uma taxa de acerto de 97,9%.

SOFTWARE DESENVOLVIDO

A Figura 7 apresenta a tela inicial do *software* Aterramento 1.0. Com este software é possível interagir totalmente com o gerador de impulsos de tensão e o sistema de aquisição de tensão e corrente, bem como analisar as amostras, obter os resultados e realizar a plotagem de dados armazenados na memória.

A interface é dividida em três partes. As principais são:

- Entradas
- Ações
- Resultados

A entrada é responsável por controlar o local onde os dados serão salvos, dados estes obtidos a cada ensaio realizado. O número de amostras garante a confiabilidade na análise, em compensação aumenta o tempo necessário para aquisição de dados de tensão e corrente. O valor adotado como padrão foi de 30 amostras. O tempo estimado para a coleta de cada amostra é de 5,6s, ou seja, é necessário aproximadamente 2,8 minutos para uma batelada com 30 amostras.

Sistema de Aquisição

Arquivo Ações U2531A Análise Sobre

Entrada

Área de Trabalho: Selecione uma área de trabalho ...

Número de Amostras: 30

Nome do Terreno: Formigueiro

Nome do Arranjo / Rótulo: haste4

☐ Plotar o transiente após análise

Ações

Iniciar Cancelar 0%

Resultados

Status: Parado

Número exato: Siga as instruções abaixo

Tempo total (seg): 0

Tempo estimado (seg): 168.000000

Instruções

1. Insira o número de amostras a ser adquirido (Default: 30)

2. Insira o nome do Terreno a ser analisado.

3. Insira o nome do arranjo/rótulo.

4. Conecte a malha a ser analisada no borne/conector vermelho.

5. Conecte a haste auxiliar-central no borne verde.

Desenvolvimento

coelce LABTERRA Concema PD ANEEL LAMOTRIZ

Parado

Figura 7. Tela inicial do aterramento 1.0 desenvolvido.

A segunda parte “ações” é responsável por dar início ao processo de identificação de uma topologia de aterramento. Esse processo consiste em aciona o gerador “n” vezes e capturar os sinais de tensão e corrente. Após isto estes valores são salvos na memória, para então serem classificados pelo software.

Ao fim do processo de coleta de amostras e análise, é apresentado para o usuário o resultado. No

campo “número exato” é possível visualizar a topologia identificada, como apresentado na Figura 8. Com uma taxa de acerto de aproximadamente 97,9%.

Resultados	
Status:	Parado
Número exato:	[4.]
Número aproximado:	3 a 4 hastes

Figura 8. Exemplo de resultado

Caso seja necessário, observar os dados de corrente e tensão coletados em forma gráfica é possível visualizar-lo, como visto na Figura 9.

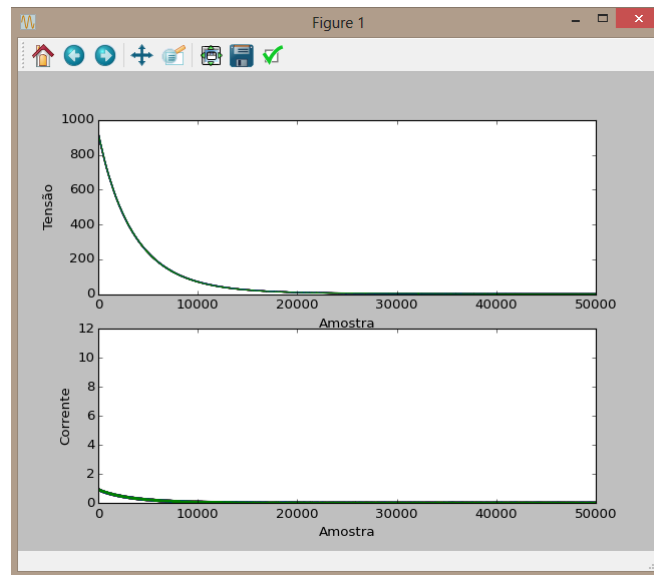


Figura 9. Forma de onda de tensão e corrente aplicados ao sistema de aterramento