

Avaliação da Influência da Resistência de Aterramento e Impedância de Surto na Operação do Sistema de Distribuição da Concessionária

A. Raizer (UFSC), G. A. D. Dias (PUC-RS), H. D. Almaguer (FURB), J. L. Silveira (CEFET-SC), M. R. de Lima (CELESC), P. C. B. Guimarães (CELESC), T. I. A. H. Mustafá (FURB), V. Steinbch (UFSC) V. L. Coelho (UFSC), W. Valente Jr. (UFSC)

Resumo- Este texto relata as principais atividades, resultados e conclusões do projeto de P&D 0395/005/2004. Simulações e modelagens de circuitos típicos de sistemas de aterramento, comparadas com medições em campo permitiram a obtenção de resultados e conclusões importantes para a definição de modelos de proteção contra sobretensões em sistemas de distribuição de energia elétrica. As medições em campo foram efetuadas através do método tradicional que avalia os aterramentos frente a correntes de baixa frequência e pela utilização de gerador de impulso que permite avaliar o comportamento do aterramento frente a correntes de surto. Programa de computador desenvolvido segundo o modelo TLM (Modelagem por Linha de Transmissão) foi utilizado para avaliar o comportamento dos aterramentos durante surtos segundo os tipos de solos e configurações normalmente utilizadas em sistemas de distribuição. O programa ATP Foi utilizado para avaliar o comportamento das sobretensões num circuito típico de baixa tensão.

Palavras-chave — Aterramento, ATP, impedância de aterramento, resistência de aterramento, sobretensões, TLM.

I. INTRODUÇÃO

Na área de transitórios eletromagnéticos temos uma grande variedade de fenômenos, que são provocados por variações súbitas de tensão ou corrente nos sistemas elétricos. Essas variações súbitas são promovidas por descargas atmosféricas, faltas nos sistemas, operações de energização de transformadores ou de banco de capacitores e operações de equipamentos de proteção ou manobra.

A avaliação simples de um sistema de aterramento em função da resistência obtida através de um terrômetro (método de Wenner), não reflete as reais condições a que estará submetido um equipamento ou instalação protegida por este sistema. Assim, uma análise de transitórios através de modelos de simulação, poderá fornecer informações importantes a projetistas e operadores quando da especificação de equipamentos de um sistema elétrico ou na determinação dos motivos que provocaram uma perturbação no sistema.

Neste artigo estão apresentados resumidamente resultados e conclusões obtidas a partir da avaliação de simulações, modelagens e medições em circuitos de baixa tensão e sistemas de aterramento típicos do sistema de distribuição de energia elétrica da CELESC.

II. MEDIÇÕES

A. Características dos circuitos de baixa tensão.

O objetivo deste trabalho foi determinar as características de um circuito de baixa tensão (BT) típico do sistema CELESC de distribuição de energia elétrica.

Para isto foram realizadas medições de aterramento e levantamento de características topológicas em campo e extraídas informações dos bancos de dados Empresa.

Considerando a grande diversidade de características entre os sistemas de distribuição das diversas regionais da CELESC e a quantidade de informações necessárias, optou-se por realizar esta etapa do projeto de pesquisa em uma região específica.

A facilidade de acesso e a disponibilidade de pessoal para obtenção de dados e acompanhamento nos serviços de campo foram os principais motivos para a escolha da regional de Itajaí (ARITA), como área piloto. Além disso, esta regional apresenta um sistema com características bastante diversificadas. Possui regiões montanhosas (próximas à serra do mar), planícies litorâneas, áreas urbanas e rurais.

1) Características Gerais dos Circuitos

Informações sobre a forma dos circuitos BT, potência dos transformadores instalados e informações importantes dos consumidores existentes nos circuitos foram extraídas de bancos de dados. O tratamento estatístico destas informações permitiu a elaboração das tabelas I e II. Ao total foram analisados 63 circuitos.

2) Aterramentos

Valores de resistência de aterramento de transformadores (TD) foram disponibilizados em relatórios provenientes de medições efetuadas pelos técnicos da Empresa. No entanto, não existiam disponibilizados nos bancos de dados, informações a respeito de resistências de aterramento de consumidores nem de finais de rede de baixa tensão (FR). Por este motivo, foram realizadas medições em circuitos típicos urbanos e não urbanos. Nestas medições foram seguidas as recomendações técnicas CELESC de medição de aterramento e o equipamento utilizado foi Megabrás modelo MTD-20KWe, devidamente aferido.

A tabela III apresenta um resumo dos valores obtidos.

TABELA I
ESTATÍSTICAS DE CIRCUITOS BT - GERAL

CIRCUITOS	VALORES	POTÊNCIA TRAFÓ (kVA)	EXTENSÃO (m)	RAMAIS (n°)	CONSUMIDORES (n°)
Urbanos	Média	55,69	413,34	1,69	48,86
	Mínimo	30,00	143,00	0,00	16,00
	Máximo	112,00	822,00	8,00	92,00
	Desvio Padrão	19,66	154,34	2,03	17,21
Rurais	Média	35,79	551,57	0,96	14,75
	Mínimo	10,00	134,00	0,00	1,00
	Máximo	112,00	1.120,00	4,00	96,00
	Desvio Padrão	20,69	232,50	1,21	18,33
Geral	Média	46,84	474,78	1,37	33,70
	Mínimo	10,00	134,00	0,00	1,00
	Máximo	112,00	1.120,00	8,00	96,00
	Desvio Padrão	22,42	204,88	1,75	24,52

TABELA II
ESTATÍSTICAS DE CIRCUITOS BT - CARGAS

VALORES	d máx. (m)	CONSUMIDORES (n°)	CONSUMO (kWh/Cons.)	CARGA (kVA)	
				CIRCUITO	CONSUMIDOR
Média	211,18	37,05	248,23	34,14	1,18
Mínimo	80,53	7,00	142,40	10,70	0,58
Máximo	428,63	95,00	847,56	58,50	3,52
Desvio Padrão	95,21	22,98	145,53	12,64	0,64

TABELA III
ESTATÍSTICAS DE CIRCUITOS BT - ATERRAMENTOS

VALORES	RESISTÊNCIA (Ohms)		
	CONSUMIDOR	FR	TD
Média	86,85	218,30	16,60
Mínimo	9,00	25,60	1,00
Máximo	290,00	780,00	106,00
Desvio Padrão	82,31	324,36	11,76

3) Resumo

A tabela IV apresenta um resumo das características gerais de um circuito BT para a regional Itajaí, de acordo com as amostras analisadas.

TABELA IV

Circuitos de Baixa Tensão (ARITA)				
Características	Valor Médio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Desvio Padrão
Potência do Trafo	46,84	10,00	112,50	22,42
Extensão (m)	474,78	134,00	1.120,00	204,88
Ramais de BT (n°)	1,37	0,00	8,00	1,75
N° Consumidores	33,70	1,00	96,00	24,52
Rtrafo (Ohms)	16,60	1,00	106,00	11,76
Rcons. (Ohms)	72,34	9,00	290,00	82,31
RFR (Ohms)	31,70	25,60	780,00	324,36
Distância Máxima ao TD(m)	211,18	80,53	428,63	95,21
Consumo Médio (kWh)*	248,23	142,40	847,56	145,53
Demanda Média (kVA)*	1,18	0,58	3,52	0,64

Uma análise das tabelas indica que o transformador típico do sistema da ARITA é aquele cuja potência é de 45 kVA, atendendo a 34 consumidores com carga média de 1,18 kVA. Os condutores mais utilizados são 4 e 2 AWG de alumínio e o 6 AWG de cobre e as resistências de aterramento médias dos transformadores, fins de rede e consumidores são, 17, 32 e 72 ohms respectivamente. Quanto à topologia os circuitos possuem um comprimento total médio de 475 metros sendo que o consumidor mais distante está localizado a 211 metros do transformador. Os circuitos são geralmente lineares, podendo possuir entre 1 (uma) e 2 (duas) derivações de BT (n.º de ramais menor do que 1,5).

Considerando o vão médio das redes secundárias como sendo de 35 metros e o circuito bilateral, pode-se considerar o croquis da figura 1 como sendo a imagem de metade de um circuito BT típico da regional de Itajaí.

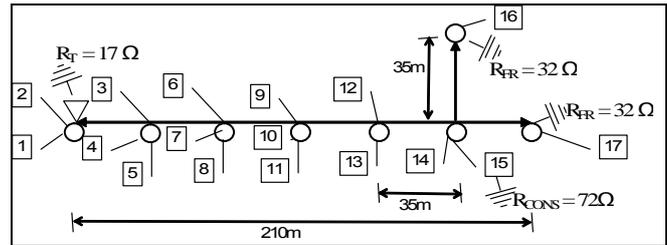


Figura 1. Circuito BT Típico - ARITA

B. Medições de impedância de aterramento

Esta etapa teve como objetivo principal avaliar o comportamento das diversas configurações de aterramento frente a tensões impulsivas. Para isto desenvolveu-se no MAGLAB - Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade Eletromagnética da UFSC, um pequeno gerador de impulso móvel, vide figura 2, permitindo a obtenção de medidas em campo, ou seja, em condições reais.

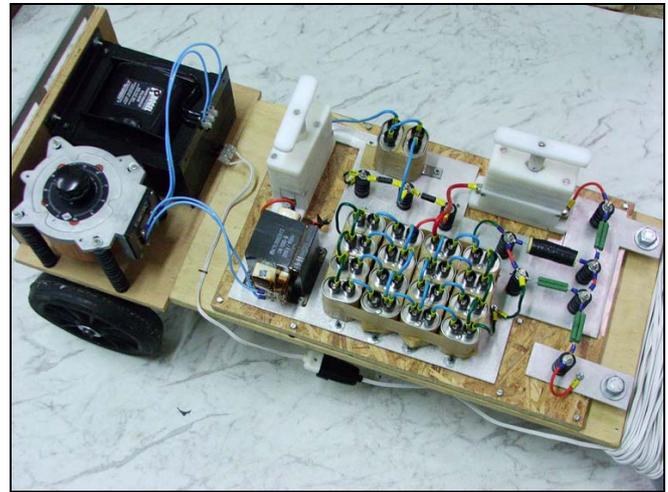


Figura 2 – Gerador de Impulso

Para agilizar os trabalhos, um campo de testes no centro de treinamento da CELESC (CEFA) foi utilizado para a realização das medidas. Neste, várias configurações típicas de sistemas de aterramento estão disponíveis, além de ser conhecido o seu perfil de resistividades, vide figura 3.

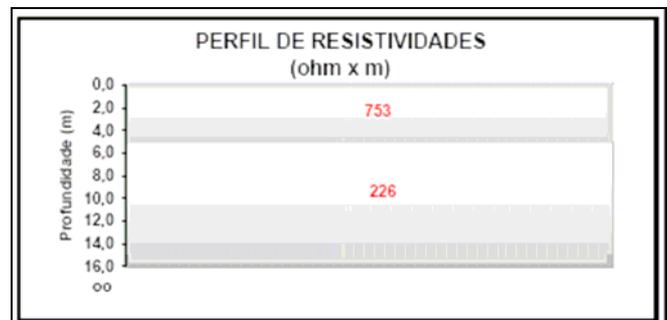


Figura 3 – Perfil de Resistividade do Solo - CEFA

As medições dos aterramentos através do terrômetro e as formas de onda de corrente e tensão obtidas pela utilização do gerador, compuseram um relatório, do qual foram extraídos os resultados apresentados nas figuras 4 a 7.

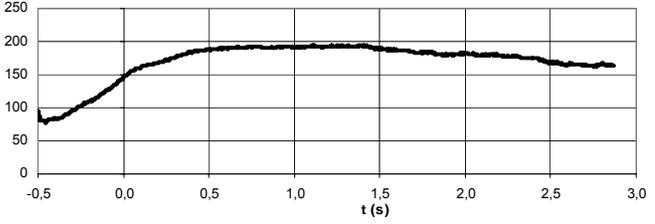
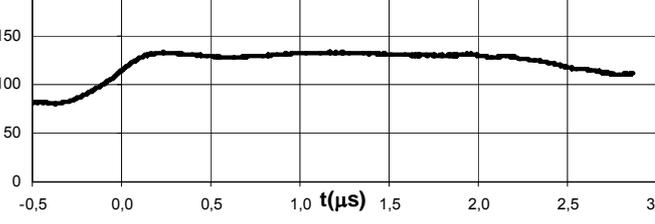
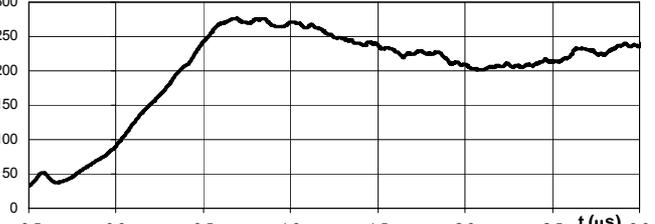
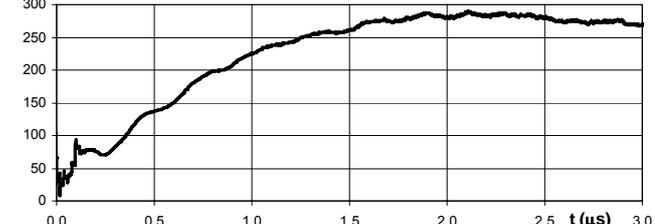
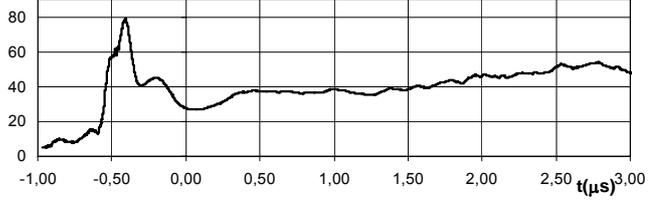
Sistema de Aterramento	Resistência CC (Ohms)	Impedância (Ohms)
a) 3 hastes aço/cobre 2,4m/16 mm interligadas e alinhadas	224	
b) 5 Hastes aço/cobre 2,4m/16 mm interligadas e alinhadas	185	
c) 3 hastes aço/cobre 2,4m/16 mm em triângulo	146	
d) Poste de concreto 10m/150 daN	198	
e) 1 haste profunda 9m/16 mm	33	

Figura 4 – Curvas de Impedância Obtidas em Campo

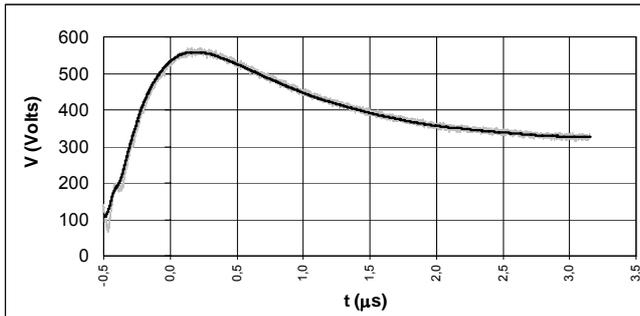


Figura 5 – Gráfico de tensão - Haste: 2,4m/16mm

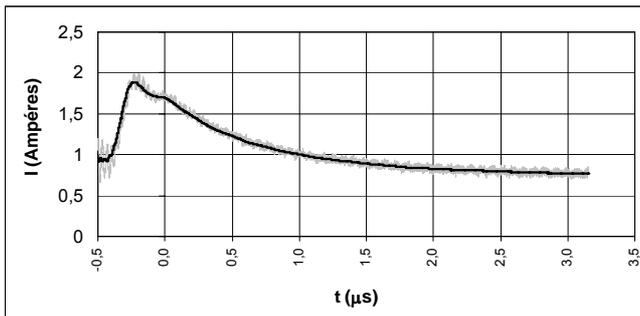


Figura 6 – Gráfico da Corrente – Haste: 2,4m/16mm

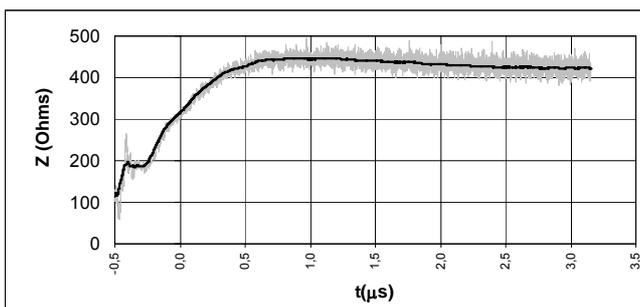


Figura 7 – Gráfico da Impedância – Haste: 2,4m/16mm

O gráfico da figura 5 representa a tensão aplicada na haste enquanto que a figura 6 mostra a corrente resultante. Os valores de Z da figura 7 foram obtidos a partir dos valores de tensão aplicada e da corrente resultante. Para este caso a resistência de aterramento medida através do terrômetro foi 360 Ohms.

No caso de uma haste profunda, figura 4e, observa-se que a forma de onda da impedância torna-se bastante diferente apresentando um valor de pico muito superior a resistência medida, que neste caso foi 33 ohms.

A análise de todas as medidas obtidas em campo permite concluir que um aterramento pode ser representado por um circuito RLC equivalente conforme figura 8. A figura 9 compara uma medida com valores obtidos a partir do circuito equivalente. Os valores de R , L e C dependem das características da malha e do solo.

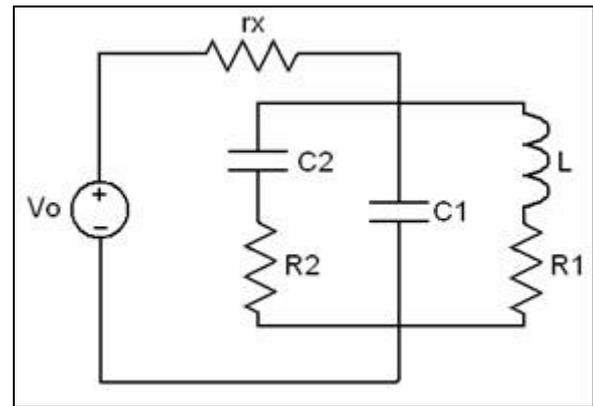


Figura 8 – Circuito Equivalente de um Aterramento

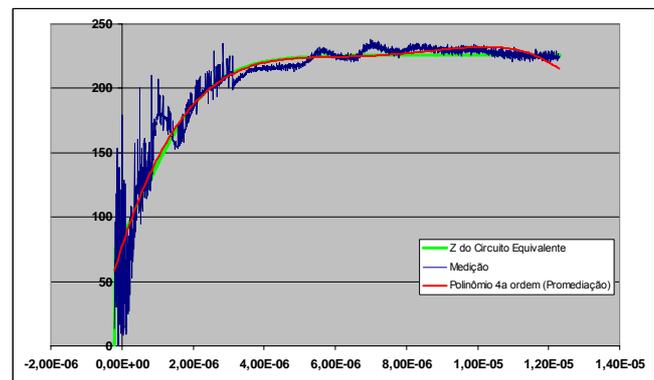


Figura 9 – Comparação: Circuito Equivalente / Medições

III. MODELAGEM TLM

Devido à alta complexidade dos fenômenos eletromagnéticos associados às descargas atmosféricas nas estruturas de aterramento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, as únicas alternativas viáveis para verificar o desempenho destas estruturas são a utilização de métodos experimentais de medição e de técnicas de simulação numérica.

Neste contexto, o método numérico de Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM), com sua grande versatilidade para a simulação dos fenômenos de propagação de ondas em inúmeras situações práticas, surge como atraente alternativa para ser utilizado no estudo de problemas de aterramento elétrico. Durante o período de desenvolvimento do projeto de pesquisa, o foco principal da aplicação do TLM foi a análise do comportamento da impedância de surto em diversas topologias de aterramento, para diferentes condições do solo. A maioria destas topologias foi analisada em estudos experimentais anteriores da própria CELESC. O diferencial da presente pesquisa consiste no uso da ferramenta computacional de simulação (o TLM), visando dar subsídios de análise, comparação e corroboração dos dados práticos, tudo isto, de uma maneira mais rápida, versátil e econômica.

A. O Método TLM

O TLM é um método numérico diferencial no domínio do tempo. Na sua formulação, é estabelecida a equivalência entre as equações de Maxwell, que descrevem a propagação das ondas interagindo com o meio físico, e as equações de circuitos elétricos, que descrevem as relações entre correntes e tensões no modelo de linhas de transmissão.

Para este trabalho, foi empregada a formulação tridimensional do método, baseada no Nó Simétrico Condensado

(SCN – *Symmetrical Condensed Node*). Para maiores detalhes sobre o método TLM, podem ser consultados o relatório final do projeto e nas referências bibliográficas citadas no mesmo a respeito do método [1-6].

B. Resultados da modelagem TLM

O principal objetivo desta etapa foi mostrar um comparativo do comportamento da curva de impedância de surto (razão entre a tensão e a corrente de surto sobre a haste de excitação do aterramento, $Z_s = V_s/I_s$) para topologias de aterramento empregadas na prática nas redes de distribuição de energia elétrica, quando modificados os seguintes parâmetros: a) a resistividade elétrica do solo (ρ , em Ω/m); b) a permissividade elétrica relativa do solo (ϵ_r).

As principais estruturas analisadas foram: a) haste única disposta verticalmente; b) três hastes dispostas verticalmente em linha e interligadas; c) cinco hastes dispostas verticalmente em linha e interligadas; d) haste única disposta verticalmente, envolvida por concreto; e e) três hastes dispostas verticalmente em linha, interligadas e envolvidas por concreto.

Para a excitação dos sistemas modelados, optou-se pelo modelo de corrente de surto atmosférico proposto pela IEC (IEC 60-1). Trata-se da dupla exponencial “8 μ s/20 μ s”, com valor de pico de corrente de 1kA.

1) Comportamento da impedância de surto atendendo à variação da resistividade do solo.

Foram desenvolvidas simulações considerando os valores limites de resistividade presentes no solo catarinense ($\rho_{\min} = 4 \Omega m$, $\rho_{\max} = 10.000 \Omega m$). A figura 10 mostra os resultados obtidos (normalizados) para o caso de uma haste. Para as topologias de três e cinco hastes, o comportamento da curva de impedância de surto foi similar, como pode ser visto no relatório final.

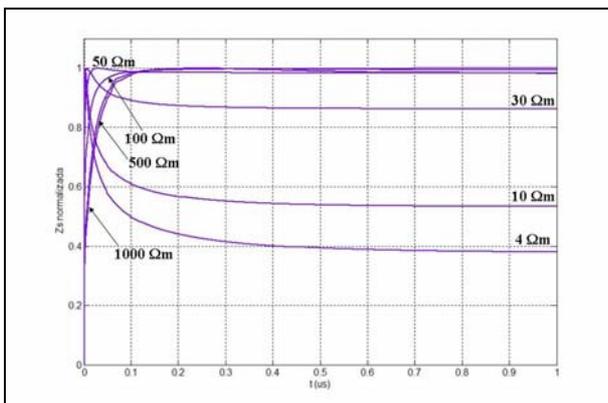


Figura 10 - Curvas de impedância de surto (normalizadas) para uma haste vertical em solo homogêneo. Verificação do efeito da variação da resistividade do solo.

Verificou-se a influência direta da resistividade do solo na forma da curva transitória da impedância de surto e no valor da resistência de aterramento. Comprovou-se que no caso de solos com baixa resistividade, a curva de impedância, após um crescimento inicial quase instantâneo até atingir o valor de pico, apresenta um comportamento transitório decrescente até alcançar o regime permanente. O contrário acontece para solos com alta resistividade, onde o comportamento da curva é totalmente crescente, alcançando o valor máximo no regime permanente (resistência de aterramento).

2) Comportamento da impedância de surto atendendo à variação da permissividade elétrica do solo.

Foram desenvolvidas simulações considerando valores relatados de permissividade relativa do solo. (de $\epsilon_r \min. = 4$, para solos secos, até $\epsilon_r \max. = 100$, para solos úmidos). A figura 11 mostra os resultados obtidos para o caso de uma haste, com resistividade do solo igual a 1.000 Ωm .

Constatou-se uma expressiva influência da permissividade de no período transitório da curva de impedância de surto, o que significa que a mesma não pode ser ignorada em estudos de problemas de aterramento em altas frequências. Para os casos de baixa resistividade, que apresentam um comportamento típico de curva de impedância decrescente (não mostrado neste resumo), verificou-se que, quanto menor o valor de ϵ_r , maior foi o valor de pico obtido no período transitório da curva de impedância de surto. Um outro resultado interessante foi o fato da variação de ϵ_r não modificar o regime permanente da curva de impedância de surto, isto é, independentemente do valor de ϵ_r , todas as curvas – para um mesmo valor de resistividade do solo - tendem ao mesmo valor de resistência de aterramento.

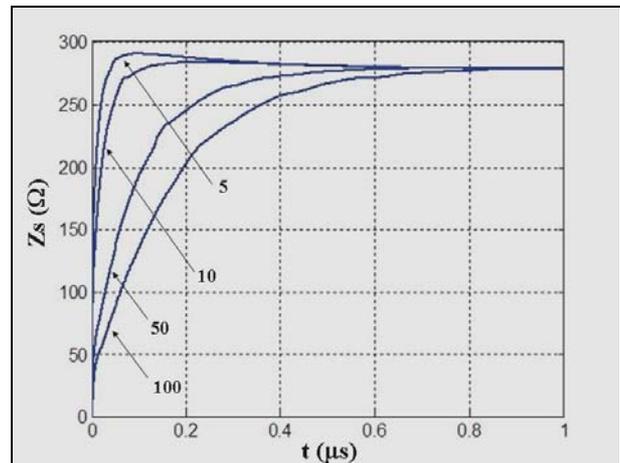


Figura 11 - Curvas de impedância de surto para uma haste vertical simples em solo homogêneo (1.000 Ωm). O valor da permissividade elétrica relativa, para cada caso, é indicado na figura.

3) Comportamento da impedância de surto atendendo à existência de um invólucro de concreto ao redor das hastes e condutores de ligação.

Comprovou-se a eficiência do uso do concreto envolvendo as hastes na redução da resistência de aterramento em solos com alta resistividade. O fato do concreto apresentar resistividade mais baixa (foi utilizado $\rho_{\text{concreto}} = 75 \Omega m$ e $\rho_{\text{solo}} = 1.000 \Omega m$) permite uma razoável atenuação dos valores máximos de tensão observados no solo, nas proximidades da haste e, conseqüentemente, menores valores de impedância de surto. Para o caso de uma haste vertical com concreto obteve-se uma redução de 35,25 % do valor da resistência de aterramento em comparação à haste sem concreto. Já no caso da topologia de três hastes verticais interligadas, a redução foi de 52 %.

C. Estudo do solo como meio dispersivo

Foi estudado que o solo pode ser tratado eletromagneticamente como um material dielétrico com perdas, apresentando características lineares e dispersivas (parâmetros σ e ϵ dependentes da frequência). Este fato não deve ser ignorado na análise de fenômenos transitórios, onde as variações de

freqüência são significativas.

Comprovou-se que é possível modelar com boa aproximação as características dispersivas dos solos aplicando a equação de *Debye* com múltiplos termos de relaxação. Isto permitiu a utilização da formulação TLM modificada para a modelagem no domínio do tempo de meios dielétricos dispersivos (utilizando técnicas de *Transformada Z*), na simulação de sistemas de aterramento elétrico para proteção contra surtos atmosféricos. Os resultados demonstraram que existem diferenças na resposta dos sistemas de aterramento no caso de utilizar parâmetros constantes (como é feito tradicionalmente) e no caso do solo ser tratado como um meio com características dependentes da freqüência.

Finalmente, é importante destacar que esta etapa da pesquisa ficou muito limitada pela falta de dados experimentais sobre os parâmetros elétricos que compõem a equação de Debye, para os diferentes tipos de solo. Sugere-se, então, o desenvolvimento de uma pesquisa mais específica, para a determinação experimental dos parâmetros elétricos dos principais tipos do solo presentes nos sistemas de aterramento, considerando o espectro de freqüência típico dos surtos atmosféricos.

IV. O PROGRAMA ATP

O programa ATP é a versão mais difundida do programa EMTP, e dispõe de versões específicas para diversos tipos de computadores e sistemas operacionais [14-18]. O mesmo faz a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes monofásicas e polifásicas, com diferentes topologias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. Durante a solução, são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

O programa permite a representação de não-linearidades, de elementos com parâmetros concentrados, de elementos com parâmetros distribuídos (linhas de transmissão), de chaves, de transformadores, de reatores, etc. De uma forma geral, são considerados parâmetros em componentes de fase e em seqüência zero e positiva, dependendo do modelo.

A estrutura do ATP compreende do programa principal e várias rotinas e/ou programas auxiliares, tais como *LINE CONSTANTS* (para cálculo de parâmetros de linhas de transmissão), *CABLE CONSTANTS* (para cálculo de parâmetros de cabos de subterrâneos), *MODELS* (ferramenta para simulação de algoritmos genéricos), *TACS* (análise transitória de sistemas de controle), *TPPLOT* (rotina de análise gráfica dos resultados) e *ATPDraw* (editor gráfico e gerenciador). Assim, a modelagem dos sistemas elétricos é feita através de uma composição de modelos analíticos e individuais, que são representados por um conjunto de equações diferenciais e algébricas, solucionadas em intervalos de tempos discretos.

A. Modelagem no ATP e resultados

Para modelagem dos sistemas de distribuição utilizaram-se componentes pré-definidos, fontes de surtos de corrente para representar as descargas atmosféricas, equivalentes *RLC* para representar os transformadores e blocos *LCC-Line Cables Constants* para representar as linhas de distribuição. Na representação de terminais consumidores utilizaram-se resistências, capacitâncias e indutores, além de medidores de corrente e tensão. A figura 12 mostra um ramal

de rede de baixa tensão da concessionária. A figura 13 mostra um transformador da rede de distribuição e um terminal consumidor, modelados no ATP.

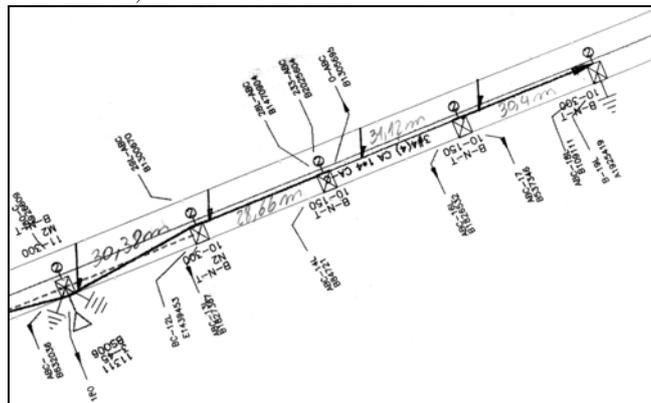


Figura 12 - Ramal de Rede de Baixa Tensão

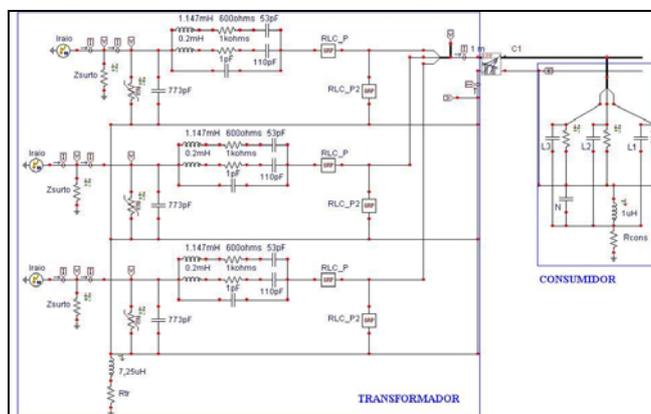


Figura 13 - Modelagem da Rede de Distribuição, com o transformador em Alta Freqüência e Um Terminal Consumidor

Para a simulação e obtenção de resultados dos níveis de sobretensão em consumidores devido a surtos transferidos ao secundário de um transformador de distribuição de 45 kVA, foram utilizados alguns ramos típicos da CELESC, e estes modelados segundo dados reais fornecidos pela concessionária.

A tabela V mostra os resultados obtidos de valores de tensão nos terminais consumidores nas três fases, considerando valores típicos de resistência de aterramento do transformador (R_{trafo}), do consumidor (R_{cons}) e de fim de rede (R_{fr}) em um dos casos de estudo modelados e analisados durante a execução do projeto de pesquisa.

Tabela V
RESULTADO DE VALORES DE TENSÃO NAS TRÊS FASES DE UM RAMAL
RADIAL COM CINCO TERMINAIS DE CONSUMIDORES

Rtrafo = 29 ohms					
Rcons = 72.34 ohms					
Rfr = 67 ohms					
Fase	Cons 1 (V)	Cons 2 (V)	Cons 3 (V)	Cons 4 (V)	Cons 5 (V)
A	753,92	1038,10	2189,40	2358,00	2506,50
B	644,17	945,06	1951,20	2082,10	2209,90
C	614,25	853,85	1802,60	1948,20	2075,20

A figura 14 mostra o resultado gráfico dessa simulação, onde observamos os níveis de sobretensão em cada um dos terminais consumidores.

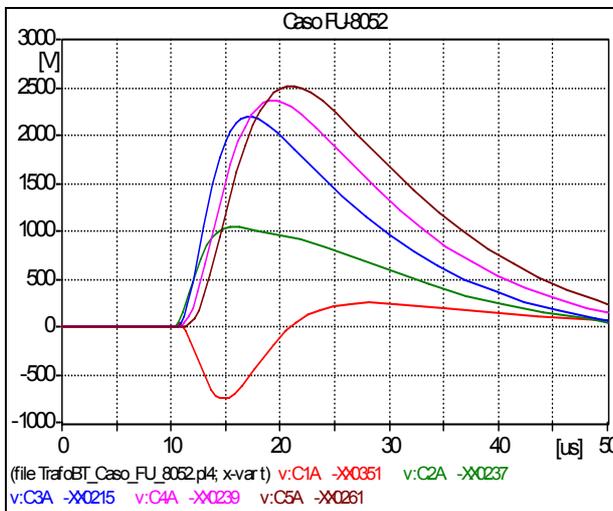


Figura 14 - Resultado Gráfico da Simulação no ATP

B. Conclusões ATP

Neste documento, foram apresentadas as principais considerações a respeito do programa EMTP/ATP, que é capaz de realizar a simulação e análise de transitórios eletromagnéticos, seja em redes monofásicas ou polifásicas, com diferentes topologias, permitindo a representação de não-linearidades e de elementos com parâmetros concentrados e distribuídos.

Considerado como padrão entre os seus programas similares, o ATP possui todos os recursos existentes em modernos simuladores, por isso é uma ferramenta essencial para realização de estudos de engenharia de sistemas, de análise de curtos-circuitos, de análise de sobretensões, de análise de contingências, de análise de falhas em equipamentos e estudos para o estabelecimento de medidas corretivas, entre outros.

Quanto à análise de sobretensões em sistemas de distribuição, devido a descargas de incidência direta na rede elétrica, observamos através das simulações no ATP que os surtos se propagam ao longo da rede, estabelecendo valores elevados de sobretensão nos diferentes pontos do circuito em função da impedância dos caminhos percorridos.

Como as sobretensões em redes de baixa tensão não devem comprometer a segurança de pessoas e nem a integridade das instalações consumidoras e de seus equipamentos,

torna-se imprescindível o estudo para a melhoria dos sistemas de aterramento, visando a atenuação dos níveis elevados de sobretensão, bem como o emprego de dispositivos de proteção contra essas sobretensões transitórias.

Desta forma, o programa de análise de transitórios ATP, se mostrou eficiente no auxílio a estudos e avaliações de sobretensões em sistemas de distribuição, fornecendo a técnicos e pesquisadores na área, informações no sentido de atenuar os problemas provenientes de descargas atmosféricas.

V. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas pesquisas efetuadas neste projeto de pesquisa são de grande importância para a obtenção de resultados subsequentes em pesquisas em desenvolvimento pela CELESC. O comportamento dos aterramentos frente a impulsos é de fundamental importância na definição de modelos de proteção de redes de distribuição frente às sobretensões de origem atmosférica. A opção errada por uma determinada topologia do sistema de aterramento pode incorrer a custos elevados para a concessionária, seja pelo custo de implantação ou por consequência de desligamentos indevidos da rede.

A seguir algumas conclusões e/ou recomendações importantes:

- Valores elevados da resistência de aterramento do transformador resultam em sobretensões de grande magnitude no circuito de baixa tensão comprometendo a segurança das instalações dos consumidores. Conseqüentemente o uso de pára-raios nas redes de BT é recomendável;
- O uso dos postes de concreto como alternativa para melhorar o aterramento das redes de distribuição deve ser considerado. Em um solo com resistividade média de 700 ohms x metro, o aterramento através da ferragem do poste apresenta um comportamento equivalente a um sistema com 3 hastes de 2,4m/16mm interligadas;
- O circuito equivalente obtido a partir das medições deve ser utilizado para representar os aterramentos sempre que se efetuar simulações em ATP;
- O TLM se mostrou ser uma excelente ferramenta na determinação dos diferentes tipos de solos e topologias de aterramento, já que os resultados obtidos neste trabalho apresentam-se muito próximos daqueles obtidos em medições reais;
- Estudos do comportamento de aterramentos através de TLM, levando em consideração ionização do solo devem ser implementados, pois podem resultar em significativas reduções de custos nos aterramentos de redes não urbanas;
- O concreto pode ser considerado uma boa alternativa aos tratamentos químicos dos solos adotados pelas empresas. Hastes de ferro envelopadas com concreto apresentaram valores de resistência de aterramento bastante inferiores aos de hastes simplesmente enterradas.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Raizer, G. A. D. Dias, H. D. Almaguer, J. L. Silveira, M. R. de Lima, P. C. B. Guimarães, T. I. A. H. Mustafá, V. Steinbach, V. L. Coelho, W. Valente Jr., “Avaliação da influência da resistência de aterramento e impedância de surto na qualidade de energia elétrica fornecida aos consumidores conectados ao sistema de distribuição da concessionária”, Projeto ANEEL/CELESC 0395-005-2004, Relatório Final. 2006,
- [2] H. A. Dominguez, “Contribuição ao Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) e sua aplicação aos estudos em Bioeletromagnetismo,” Tese de Doutorado, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [3] R. D. Strum, D. E. Kirk, *First Principles of Discrete Systems and Digital Signal Processing*, Addison – Wesley Publishing Company, New York, 1989.
- [4] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, *Discrete – Time Signal Processing*, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1999.
- [5] M. O’Flynn, E. Moriarty, *Linear System – Time domain and Transform Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- [6] A. Oppenheim, A. Willsky, I. Young, “Signals and Systems.” London: *Prentice – Hall, Inc.*, 1983.
- [7] C. M. Portela, “Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems I – Physical and Methodological Aspects.” In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (August 1997: Austin - Texas). *Proceedings*. EUA, 1997. p. 379 – 384.
- [8] C. M. Portela, “Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems II – Practical Application Examples” In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (August 1997: Austin - Texas). *Proceedings*. EUA, 1997. p. 385 – 390.
- [9] P. J. Clebicar, “Influência da Estratificação do Solo na Impedância Impulsiva de Aterramento de Linhas de Transmissão.” Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- [10] I. E. T. Iben, W. A. Edelstein, P. B. Roemer, “Dielectric Properties of Soil: Application to Radio Frequency Ground Heating.”. General Electric Company, EUA, GE Technical Information Series, October 1996.
- [11] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. 1. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1989.
- [12] H. A. Von, *Dielectric and Waves*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1954.
- [13] J. Paul, “Modelling of General Electromagnetic Material Properties in TLM.” Ph. D. Thesis – University of Nottingham. England, 1998.
- [14] J. A. Filho, M. P. Pereira, *Curso Básico Sobre a Utilização do ATP*. Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, Nov. 1996.
- [15] A. D’Ajuz,; C. S. Fonseca,; F. M. S. Carvalho, *et al. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*. FURNAS e Editora UFF(Universidade Federal Fluminense).
- [16] Bonneville Power Administration, Electromagnetic Transients Program (EMTP) Rule Book, April , 1982.
- [17] *Guidelines for Representation of Network Elements When Calculating Transients*. CIGRE Working Grouping 33.02.
- [18] M. Kizilcay, L. Prikler, *ATP-EMTP Beginners Guide for EEUG Members*, Osnabruck University of Applied Science, Germany, June 2000.