



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC - 31
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**ESTUDO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DA ASSOCIAÇÃO
SÉRIE-PARALELO**

**Luiz Gonçalves Jr.*
FEB**

**Ruy A. C. Altafim
EESC
UNESP USP**

**Cláudio V. de Aquino
FEB
UNESP USP**

**Alexandre Piantini
IEE**

RESUMO

É consenso entre pesquisadores e engenheiros da área de sistemas de potência de que a melhoria dos sistemas de proteção na transmissão e distribuição de energia elétrica está intimamente relacionada com o comportamento não linear dos sistemas de aterramento quando estes são percorridos por altas correntes impulsivas. Baseado nessa premissa, este informe técnico apresenta uma metodologia capaz de reproduzir os dois mecanismos mais aceitos pela comunidade científica, o *Mecanismo de Condução Eletrolítica* e o *Mecanismo de Canal*, para explicar tal comportamento, lançando mão de um computador digital com um programa do tipo SPICE-Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramento, Modelagem, Descargas Atmosféricas, Sobretensões, Proteção de Linhas de Transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Desde 1928, quando H. M. Towne (1) publicou seus resultados pode-se constatar que a resistência de um sistema de aterramento de um eletrodo concentrado, submetido a correntes impulsivas de altas intensidades, ao ser comparada com aquela medida em frequência industrial, tem seu valor reduzido. Todavia, quando o enfoque se volta para um aterramento de grandes dimensões, Gupta e Thapar (2) mostraram que não é incomum essa resistência impulsiva apresentar um valor maior do que aquele obtido na frequência industrial.

Estes resultados criaram entre os pesquisadores e os engenheiros um consenso de que a melhoria dos sistemas de proteção na transmissão e distribuição de energia elétrica está intimamente relacionada com os valores das resistências dos sistemas de aterramento, sob altas correntes impulsivas. Contudo, mesmo hoje, após inúmeras investigações sobre esse comportamento impulsivo, ainda não se chegou a uma metodologia de fácil aplicação para considerá-lo nos projetos.

Esse fenômeno normalmente é considerado como sendo composto por dois mecanismos de condução, um linear, chamado de *Mecanismo de Condução Eletrolítica* e outro não linear, chamado de *Mecanismo de Canal*. Diversas propostas têm sido divulgadas para contemplá-los. No ano de 1984, em (3), Liew e Darveniza propuseram um modelo dinâmico para descrever esse mecanismo não linear, no qual a resistividade do solo era descrita como função da densidade de corrente existente entre o eletrodo e as camadas do solo mais próximas. Por sua vez, em (4), Velazquez e Mukhedkar descreverem essa não linearidade através do conceito de um raio geométrico fictício e variável ao longo do eletrodo. Esse raio, função de um gradiente crítico de tensão, seria maior nas proximidades do ponto de injeção da corrente e iria gradativamente reduzindo-se para pontos distantes.

Outra proposta, que tem sido amplamente considerada, foi aquela apresentada por Kosztaluk e colaboradores, em

*Av. Engº Luiz Edmundo. C. Coube, S/N - CEP 17033-360 - Bauru - SP - BRASIL
Tel.: (014) 3103-6115 - Fax: (014) 3103-6116 - e-mail: luizqjr@feb.unesp.br

(5), que inclusive foi motivadora desta metodologia ora apresentada. Kosztaluk desenvolveu um modelo analógico, nos moldes do TNA-Transient Network Analyzer, onde os parâmetros lineares do solo foram representados por componentes elétricos discretos, tais como resistências, indutâncias e capacitâncias. O comportamento não linear do solo, após ter sido determinado em laboratório com o emprego de modelos físicos, foi representado analogicamente por blocos de carbetto de silício, similares àqueles empregados em pára-raios de linha.

Em (6), no ano de 1995, Loboda e Pochanke, colaboradores de Kosztaluk, vislumbraram a possibilidade de simular digitalmente esse comportamento não linear, propondo um conjunto de equações não lineares. Essas equações serviram de base para a elaboração de um bipolo elétrico, objeto precípuo deste trabalho, e que ao ser excitado por uma corrente impulsiva, simula em seus terminais, o mecanismo de canal não linear.

Completando este trabalho, também será apresentado um outro bipolo que também contempla o mecanismo de condução linear. Neste último bipolo a resistência de uma haste de terra é obtida separando-se, a partir da superfície do eletrodo, o solo ao redor em quatro superfícies, duas cilíndricas concêntricas e duas hemisféricas, também concêntricas.

Esta separação permite que a resistência de aterramento possa ser determinada pela associação em série e em paralelo das resistências do solo compreendido entre essas superfícies. As regiões nas proximidades do eletrodo, onde se verifica o mecanismo de canal são representadas por duas resistências não lineares em paralelo, R_{Cm} e R_{Hm} , uma relativa a parte cilíndrica e outra à hemisférica. Nas outras duas regiões mais afastadas, onde se verifica o mecanismo de condução eletrolítica também pode ser representado por duas outras resistências, R_{Cl} e R_{Hl} , em paralelo.

Associando-se, esses dois conjuntos em série obtém-se um bipolo equivalente, que pode ser facilmente simulado em programas computacionais similares ao **SPICE-Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis** (7), ou **PSCAD™-Power Systems Computer Aided Design** (8). Vale também ressaltar que esta metodologia pode ser aplicada tanto para pequenos aterramentos, a exemplo das hastes, como também para grandes sistemas de aterramento, como as malhas e cabos contrapeso, desde que esses sistemas possam ser representados por arranjos de hastes simples.

2.0 - BIPOLO NÃO LINEAR

Baseados na análise de gráficos, semelhantes aqueles descritos na Figura 1, Loboda e colaboradores (6) determinaram as Equações (1) e (2) que regem o comportamento não linear do solo, considerando os parâmetros ilustrados na Figura 1. Observa-se que os parâmetros A e α são constantes que definem as características não lineares das curvas.

$$\frac{di_N(t)}{dt} = \frac{1}{T} [AU(t)^\alpha - i_N(t)] \quad (1)$$

$$i(t) = U(t)G_L + i_N(t) \quad (2)$$

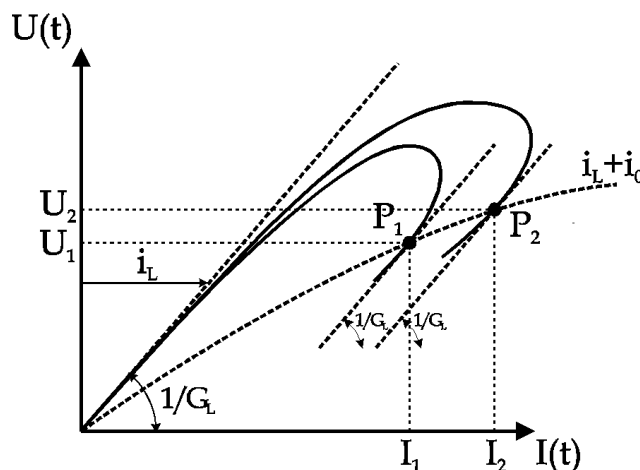


FIGURA – 1. Curvas Características não lineares do solo e seus principais parâmetros.

Nas simulações computacionais, efetuadas com os programas comerciais tipo SPICE (7), essas equações necessitam ser representadas por circuitos elétricos ou bipolos elétricos. Esta representação consiste no cerne do

presente trabalho e ressalta-se que inúmeros circuitos foram propostos antes de ter sido possível obter o bipolo apresentado na Figura 2. Este bipolo contendo duas fontes de corrente dependentes de tensão possui equações similares às (1) e (2) como pode ser visto, pela análise de suas malhas.

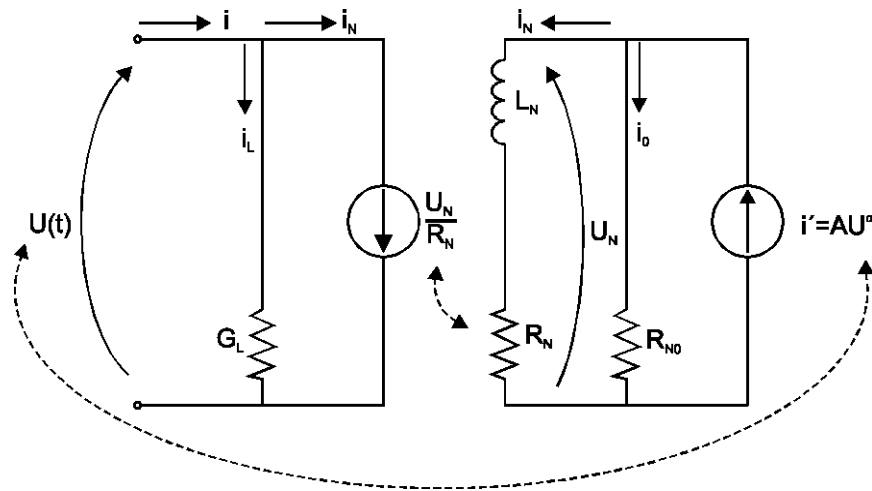


FIGURA – 2. Bipolo Equivalente às equações de Loboda e colaboradores.

As equações desse circuito podem ser escritas como:

$$i(t) = i_L(t) + i_N(t) \quad (3)$$

onde

$$i_L(t) = \frac{U(t)}{R_L} \quad (4)$$

e

$$R_{N0}i_o(t) = R_Ni_N(t) + L_N \frac{di_N(t)}{dt} \quad (5)$$

como

$$i_o(t) = AU(t)^\alpha - i_N(t) \quad (6)$$

fazendo $R_{N0} \gg R_N$ tem-se a equação

$$\frac{di_N(t)}{dt} = \frac{R_{N0}}{L_N} [AU(t)^\alpha - i_N(t)] \quad (7)$$

Como se observa, as Equações (3) e (7) são idênticas às equações de Loboda (1) e (2), quando se substitui $\frac{R_{N0}}{L_N}$ por $\frac{1}{T}$

3.0 - MÉTODO DA ASSOCIAÇÃO SÉRIE-PARALELO

3.1 Resistência Linear de Um Eletrodo Cilíndrico Vertical

De forma geral, o cálculo de uma resistência elétrica pode ser efetuado de forma precisa através da Equação (8),

$$R_{\text{Dwight}} = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_0} - 1 \right) \quad (8)$$

de Dwight (9), ou ainda pela Equação (9) mais simplificada, de Liew-Darveniza (3).

$$R_{\text{Liew-Darveniza}} = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{r_0 + l}{r_0} \right) \quad (9)$$

Contudo, nenhuma dessas expressões é adequada para a inclusão do bipolo não linear, que leva em consideração a ionização do solo, descrita no item anterior. Assim, foi proposto um novo método de cálculo simplificado, baseado na associação série-paralelo de resistências do solo. Neste método, a resistência de uma haste cilíndrica de comprimento l e raio r_0 é entendida como sendo uma associação de duas resistências paralelas, como ilustrado na Figura 3-(a), sendo uma a resistência de um cilindro de comprimento l e raio r_0 , mas sem considerar sua extremidade, R_C na Figura 3-(b), e outra a de um hemisfério também de raio r_0 , R_H na Figura 3-(c). No caso de R_C seu cálculo pode ser efetuado considerando-se apenas a área lateral do cilindro, como ilustra a Equação (10). Uma boa aproximação dessa expressão se consegue, considerando o raio r_2 como sendo $2l$.

$$R_C = \rho \int_{r_0}^{r_2} \frac{dr}{2\pi r l} \quad \text{com } r_2 = 2l$$

$$R_C = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r_0} \quad (10)$$

E no caso do eletrodo hemisférico, a resistência é conhecida e dada pela equação

$$R_H = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad (11)$$

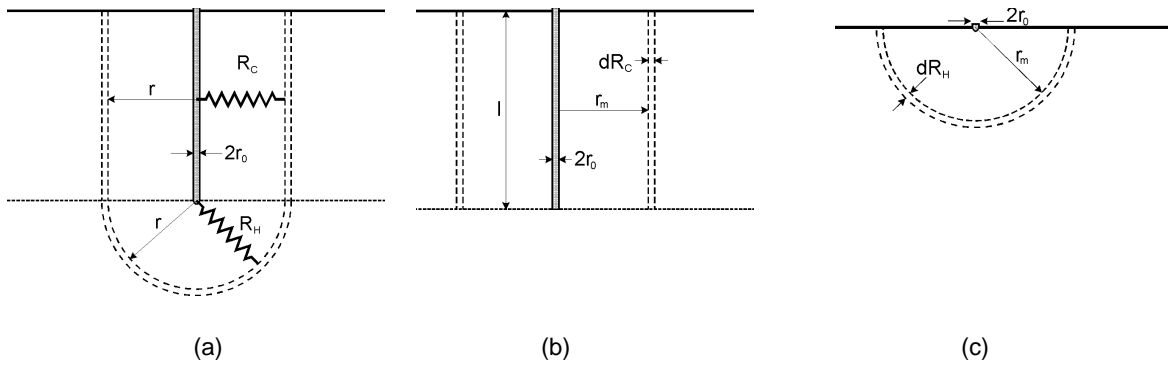


FIGURA – 3. Resistência de uma haste cilíndrica. a) Como uma associação paralela de duas resistências uma com haste cilíndrica sem a contribuição de sua extremidade e outra como um hemisfério; b) haste cilíndrica sem a contribuição de sua extremidade e c) Hemisfério de raio r_0 . Uma comparação entre os três métodos de cálculo pode ser vista na Tabela 1.

TABELA 1 – Comparação entre os três métodos de cálculo.

	Haste de 0,61 m			Haste de 3,05 m		
Raio (mm)	Dwight (Ω)	Liew-Darveniza (Ω)	Paralelo (Ω)	Dwight (Ω)	Liew-Darveniza (Ω)	Paralelo (Ω)
12,7	111,10	101,56	108,77	30,62	28,62	31,41
25,4	93,01	84,00	86,99	27,00	25,03	27,35
50,8	74,93	66,94	65,58	23,38	21,45	23,14
	Haste de 6,0 m			Haste de 9,14 m		
Raio (mm)	Dwight (Ω)	Liew-Darveniza (Ω)	Paralelo (Ω)	Dwight (Ω)	Liew-Darveniza (Ω)	Paralelo (Ω)
12,7	17,36	16,34	17,91	12,13	11,46	12,54
25,4	15,52	14,51	15,92	10,92	10,25	11,25
50,8	13,68	12,68	13,85	9,71	9,05	9,92

3.2 Inserção do Comportamento Impulsivo

Para a inserção do comportamento impulsivo nessa metodologia, simplesmente considera-se que a resistência do elemento cilíndrico pode ser descrita como sendo a associação em série de duas resistências R_{Cm} , representada pelo bipolo não linear e R_{Cl} , que considera o restante linear, e a resistência do elemento hemisférico, também como associação de duas resistências de dois hemisférios, de raio r_0 e de raio r_m , sendo uma relativa ao comportamento não linear e outra relativa ao comportamento linear, ou seja,

$$R_C = R_{Cm} + R_{Cl}$$

$$\text{com} \quad R_{Cl} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r_m}$$

$$R_H = R_{Hm} + R_{Hl}$$

$$\text{com} \quad R_{Hl} = \frac{\rho}{2\pi r_m}$$

O raio r_m nesse modelo é definido pelo raio do modelo físico, análogo ao descrito por Kostaluk em (5) ou do circuito de ensaio de campo, necessário a obtenção das curvas não lineares descritas na Figura 1.

4.0 - CONCLUSÃO

A nova metodologia de cálculo de resistência de terra ora descrita fornece uma boa aproximação no cálculo de hastes cilíndricas, quando comparada com os métodos clássicos, como visualizado pela Tabela 1. Além de possibilitar facilmente a inclusão do comportamento não linear do solo. Destaca-se também o desenvolvimento de um bipolo não linear que pode ser usado em programas simuladores similares ao SPICE e PSCAD para simular o comportamento não linear de um sistema de aterramento, quando atingido por correntes impulsivas. Contudo, estudos estão sendo desenvolvidos para aperfeiçoar esta metodologia no sentido de também solucionar outras configurações de sistemas de aterramento normalmente encontradas, tais como, hastes em paralelo, disposta em linha ou na forma triangular e hastes profundas.

5.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos à Companhia Paulista Força e Luz por dar suporte à pesquisa, que possibilitou a elaboração deste trabalho, através do projeto de P & D "*Desenvolvimento de Metodologia para a Análise de Sistemas de Aterramento, Interferência e Transitórios Eletromagnéticos com a Utilização de Programas Aplicativos*".

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) TOWNE, H. M. Impulse characteristics of driven grounds, General Electric Review, Vol. 3, 1928.
- (2) GUPTA, B. R., THAPAR, B. Impulse impedance of grounding grids, IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, Nov/Dec, 1980.
- (3) LIEW, A. C., DARVENIZA, M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths, Proc. of IEE, Vol. 121, No. 2, February 1974.
- (4) VELAZQUEZ, R., MUKHEDKAR, D. Analytical modelling of electrodes transient behavior, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 3, No. 6, pp. 1314-1322, Jun., 1984.
- (5) KOSZTALUK, R., LOBODA, M., MUKHEDKAR, D. Experimental study of transient ground impedances, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4653-4660, Jun., 1984.
- (6) LOBODA, M., POCHANKE, Z. Experimental study of electric properties of soil with impulse current injections, ICLP '85 - 18th International Conference on Lightning Protection, 16-20 September, Munich, pp. 191-198, 1985.
- (7) RABAEY, J. M. The SPICE Page, Berkeley Wireless Research Center, <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE>, acesso em 13/01/2005.
- (8) MANITOBA HVDC RESEARCH CENTRE. PSCAD - Visual Power System Simulation, <http://pscad.com>, acesso em 13/01/2005.
- (9) DWIGHT, H. B. Calculation of resistance to ground, Electrical Engineering, pp. 1319-1329, Dec., 1936.