



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

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO - X**

**GRUPO DE ESTUDOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**RESULTADOS ORIGINAIS DE UMA INVESTIÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE A IONIZAÇÃO DO SOLO  
SUBMETIDO A CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**Silvério Visacro\*      José Luís Cerqueira Lima      Wyllyam L. F. Pinto  
LRC - Lightning Research Center - UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais**

**RESUMO**

Foram realizados ensaios experimentais para avaliar o efeito da ionização em diferentes solos com vários valores de umidade. Correntes impulsivas foram injetadas em amostras de solo configurando distribuições uniforme e não-uniforme de campo elétrico. Verificou-se que a não uniformidade de campo influencia significativamente o valor do campo elétrico crítico  $E_c$ , necessário para o início de ionização do solo, diminuindo o seu valor em relação à condição de distribuição de campo uniforme. Verificou-se que este parâmetro apresenta comportamento dinâmico com valor oscilando entre 0,3 MV/m e 0,8 MV/m.

**PALAVRAS-CHAVE**

Aterramentos Elétricos, Descargas Atmosféricas, Ionização do Solo, Comportamento não-linear do Aterramento

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O efeito de ionização no solo tem sido investigado há anos [1 a 11]. No que diz respeito às correntes de descargas atmosféricas, este efeito pode ser relevante para diminuir a impedância de aterramento, quando correntes muito elevadas são injetadas em eletrodos concentrados [13].

Um dos parâmetros fundamentais requerido para a avaliação da intensidade deste efeito é o chamado Campo Elétrico Crítico  $E_c$ . Este corresponde ao campo limiar, quando o efeito se torna presente no solo. Há muita controvérsia sobre o valor adequado a ser adotado para este parâmetro nas avaliações numéricas e analíticas da ionização do solo. O problema é que a intensidade deste efeito é extremamente dependente deste valor.

Basicamente duas diferentes propostas foram apresentadas por pesquisadores que haviam investigado tal efeito. O primeiro deles sugere um valor da ordem de 0,9 MV/m para  $E_c$ . É com base nos resultados dos Oettlé [9], que avaliou este campo por meio da aplicação de correntes impulsivas em amostras de solo preenchendo a lacuna entre os discos condutivos em paralelo (e também entre os hemisférios). A outra escola sugere que esse valor é muito inferior (cerca de 0,3 MV/m). Ele é baseado nos resultados das medições feitas por diversos autores, em duas diferentes condições: (i) ensaios no terreno, que consiste em injetar corrente impulsiva em barras verticais colocadas em solos naturais ou (ii) em ensaios laboratoriais que consistem em injetar corrente impulsiva em amostras preenchendo o espaço entre condutores cilindros coaxiais. Este último valor é mais comumente usado em avaliações de proteção contra raios.

Além disso, vários modelos foram propostos para explicar o processo de ionização ou para calcular o seu efeito sobre a resposta dos eletrodos de aterramento, como o tradicional trabalho realizado por Liew e Darveniza [4], ou

(\*) LRC -UFMG - Av. Antônio Carlos, 6.627 - CEP 30.161-970 - Belo Horizonte - MG - Brasil  
fone: 31. 34094872 - telefax: 31. 34095455 - e-mail: [Lrc@cpdee.ufmg.br](mailto:Lrc@cpdee.ufmg.br)

algumas outras abordagens, tais como as que supõem um aumento equivalente do raio do eletrodo para calcular a redução da impedância devido à ionização [11]. Algumas propostas recentes atribuem um valor de resistência para a zona ionizada em torno do eletrodo [12].

Definitivamente, as questões mais importantes neste tópico dizem respeito a estabelecer referências confiáveis para o campo elétrico crítico. Um segundo ponto é definir a forma de articular essas referências para calcular o efeito do processo. Esta questão específica é o foco deste trabalho.

## 2.0 - DESENVOLVIMENTOS

### 2.1 Metodologia

Os autores desenvolveram uma investigação experimental sobre o processo de ionização do solo. Realizaram testes laboratoriais, consistindo na aplicação de correntes impulsivas em amostras de solos através de um gerador de tensão de impulso, para se obter altas densidades de corrente (e, portanto, de intensidade de campo elétrico) no solo. A tensão aplicada (e, também, a densidade de corrente) foi aumentada por passos até que o campo associado fosse capaz de iniciar o processo de ionização. Procedimento semelhante foi adotado por Oettlé para uma condição de campo uniforme, no espaço entre dois discos paralelos [9]. Neste caso, uma vez que o campo crítico é alcançado, ocorre a ruptura da amostra de solo. Este procedimento também foi aplicado por Loboda [7] e Visacro [11], para campos cilíndricos não uniformes, com o intuito de se observar a evolução do processo de ionização, em função da intensidade do campo elétrico aplicado no solo que preenche a lacuna entre dois condutores coaxiais. Neste último caso, como a intensidade do campo é muito mais elevada perto do interior do eletrodo e diminui com o aumento do raio, é possível observar a evolução (expansão) da zona ionizada, enquanto a tensão aplicada e o campo resultante vão sendo aumentados.

Os experimentos dos autores apresentam dois aspectos diferenciais. Nos trabalhos anteriores da literatura, os testes foram realizados para apenas uma das condições de campo (uniforme ou não-uniforme). Além disso, o efeito da resistividade do solo foi avaliado sempre considerando apenas solos de diferentes tipos. No presente trabalho, para cada amostra do solo e umidade, foram realizadas avaliações para as duas condições de campo, o que permite comparar os resultados de cada condição. Além disso, a mudança de resistividade foi obtida através da variação do teor de água do solo. Isto permitiu avaliar a influência da resistividade separadamente, sem a interferência de outros fatores associados às diferenças de tipos de solo.

### 2.2 Os ensaios e medições

Os testes consistiram basicamente em injetar ondas de corrente impulsiva em amostras de solo através de um gerador de impulso de alta tensão, Figura 1. A tensão (e, portanto, a corrente), foi aumentada por passos até ruptura solo, com um "flashover" entre os eletrodos. A tensão aplicada e a corrente resultante foram medidas para cada impulso e os dados foram registrados e armazenados em um computador.

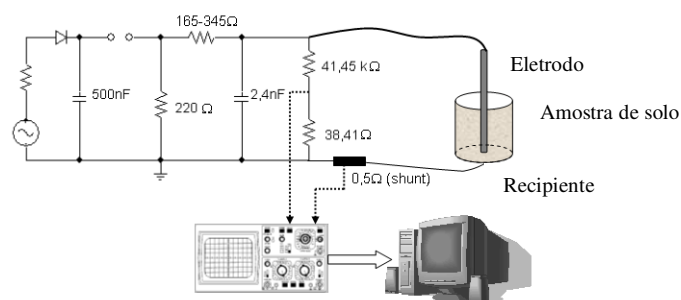


FIGURA 1 – Montagem experimental: Correntes impulsivas com dois diferentes tempos de frente de onda ( $\sim 1$  e  $3 \mu\text{s}$ ) providas por um gerador de impulso de alta tensão da Haefley forma aplicadas nas amostras de solo.

Condições de distribuição uniforme e não-uniforme de campo elétrico no solo foram testadas para cada amostra respectivamente através de uma configuração de discos paralelos (Figura 2.a) e de um cabo coaxial, com um eletrodo interior de raio 0,72 cm e de comprimento 19,5 cm (Figura 2.b).



(a) discos paralelos:  
 $D = 19,3$  cm,  $d = 2$  cm

(b) condutores coaxiais:  $L = 19,5$  cm  
 $R_0 = 0,72$  cm,  $R_{ext} = 22,25$  cm

FIGURA 2 – Eletrodos e recipientes usados para gerar configurações uniforme (a) e cilíndrica (b) de distribuição de campo elétrico na amostra de solo

Quatro tipos de solos, classificados adiante como tipos I a IV, foram testados. Para preparar as amostras, inicialmente secava-se o solo. Depois água não ionizada era adicionada a ele. Após misturá-lo, o solo ficava em repouso, num recipiente de plástico, lacrado para se obter amostras uniformes com diferentes valores de resistividade, de acordo com o peso de água adicionada.

### 3.0 - RESULTADOS

#### 3.1 Resultados preliminares

Dois resultados preliminares foram obtidos de acordo com a configuração do recipiente em teste. Para os discos paralelos responsáveis pela distribuição de campo uniforme na amostra de solo, foram registradas ondas de tensão para o aumento da amplitude da tensão aplicada de 5 kV para a tensão de ruptura. A Figura 3 ilustra esse resultado para o solo tipo I a  $600 \Omega.m$ . Ela apresenta a tensão de ruptura para correntes com tempos de frente iguais a 1 e 3  $\mu s$ . Para a configuração de eletrodo coaxial, responsável por uma distribuição de campo cilíndrico na amostra de solo, a tensão e as ondas de corrente relacionadas foram obtidas para acompanhar a evolução do processo de ionização, enquanto a intensidade do campo aplicado foi aumentada, conforme ilustrado na Figura 4, para a mesma amostra do solo da Figura 3. Embora esta figura mostra apenas o resultado para corrente de tempo de frente de 1  $\Omega s$ , medições foram feitas também para tempo de frente igual a 3  $\mu s$ .



FIGURA 3 – Resultado primário típico: ondas de tensão impressas às amostras do solo entre as placas paralelas.



FIGURA 4 – Resultado primário típico: ondas de tensão impressas às amostras do solo entre condutores coaxiais.

### 3.2 Resultados elaborados

Baseado nos resultados preliminares, alguns resultados elaborados foram derivados para permitir a análise do fenômeno. Em primeiro lugar, o campo elétrico crítico no campo de distribuição uniforme foi determinado para cada amostra. Este resultado é mostrado na Tabela 1, tendo sido calculado diretamente da tensão de ruptura.

TABELA 1 – Campo Elétrico Crítico: Campo de ruptura

Tipo de solo	Resistividade ( $\rho$ ) [ $\Omega$ .m]	Campo de ruptura ( $E_R$ ) [kV/cm]	
		Tempo de frente	
		1 $\mu$ s	3 $\mu$ s
I	600	9.3	9.0
	350	6.0	6.3
	250	5.5	6.1
II	1090	9.5	6.0
	600	5.8	5.7
	240	5.2	5.3
III	80	4.2	5.0
	10000	5.3	5.5
	7000	5.0	5.0
IV	2000	3.7	3.7
	10000	14.2	14.4
	5000	12.0	11.6
	3000	10.0	9.0

Para o campo de distribuição não uniforme, dois tipos alternativos de resultados foram desenvolvidos a partir da tensão e ondas de corrente. Em primeiro lugar, para suportar uma análise qualitativa em relação à evolução do processo de ionização, foram construídas curvas "VxI" a partir de cada par de ondas de tensão e corrente, correspondentes a um único ensaio. Tais resultados não são aqui apresentados por terem sido já explorados em outros trabalhos e podem ser referenciados no artigo no qual se baseia o presente trabalho (20).

Outro resultado consiste em curvas, apresentando o valor instantâneo da relação " $v(t)/i(t)$ ", ao longo da escala de tempo, calculado para cada par correspondente de ondas de tensão e corrente. Esta razão é aqui designada de impedância transitória da amostra do solo  $Z(t)$ . A Figura 5 ilustra este tipo de resultado para a amostra de solo específico da Figura 4. Resultados semelhantes aos das Figuras 3 a 5 foram obtidos para cada amostra e resistividade do solo, considerando os dois valores de tempo de frente de corrente.



FIGURA 5 – Impedância transitória da amostra de solo  $Z(t) = v(t)/i(t)$ : Para cada amostra esta razão foi calculada para ondas de tensão e corrente (exemplo: solo I, 600  $\Omega$ .m)

## 4.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Resultados para campo uniforme

Quanto aos resultados para a distribuição de campo uniforme, observou-se grande dispersão do valor do campo de ruptura: de 3,9 a 14,4 kV/cm, de acordo com o tipo de solo e resistividade. No entanto, verificou-se que o valor médio é elevado, da ordem de 7,4 e 7,1 kV/cm, respectivamente para correntes com tempo de frente de 1 e 3  $\mu$ s, e os menores valores tendem a ser superiores à faixa 5 kV/cm. Valores abaixo deste limiar são encontrados apenas em condições em que o solo está extremamente úmido (solo encharcado). A faixa de valores é coerente com aquela encontrada em Oettlé [9], sugerindo valores elevados para o campo elétrico crítico, da ordem de 8 kV/cm.

Outro resultado encontrado para a condição de campo uniforme é a clara dependência do campo elétrico crítico no solo com o valor da resistividade. A Figura 6 resume este resultado para todos os testes e os solos e mostra o crescimento do campo crítico com o aumento da resistividade. Oettlé também encontrou resultados semelhantes [9], embora para solos diferentes. Os resultados encontrados neste trabalho são um pouco mais significativos, uma vez que foram obtidos para o mesmo solo em diferentes valores de resistividade obtidos apenas mudando o conteúdo de água do solo. As outras propriedades do solo, dentre as quais a porosidade e a granulometria, foram preservadas na avaliação. De qualquer maneira, a tendência observada por Oettlé para diferentes solos foi também verificada para os solos do presente trabalho.

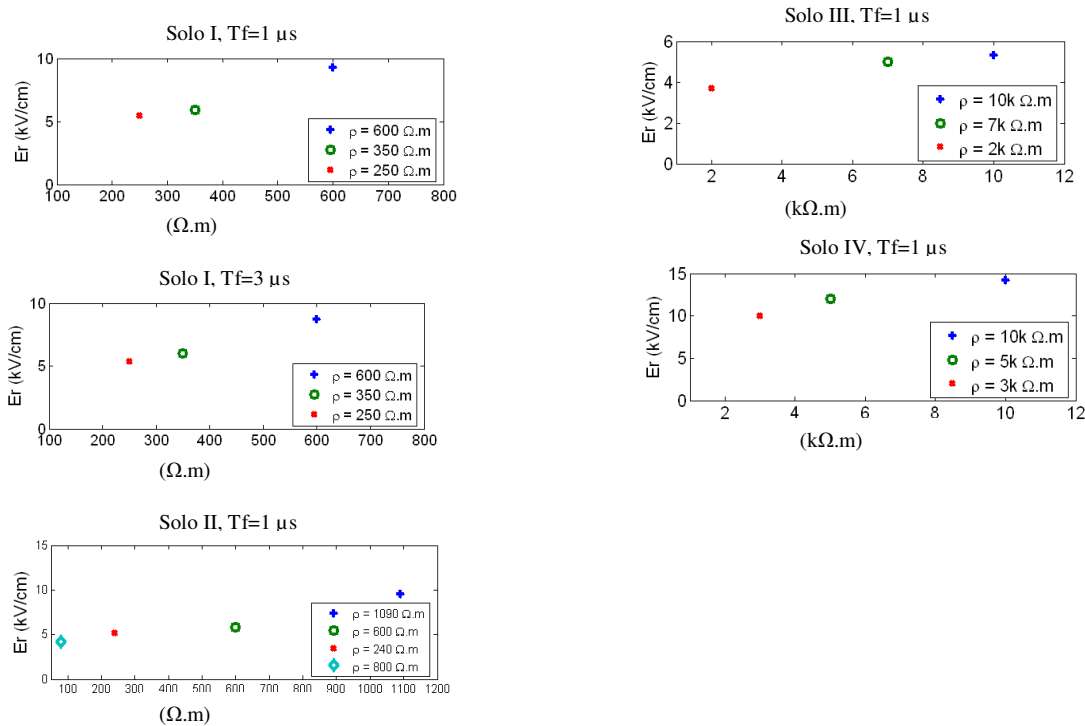


FIGURA 6 – Relação entre o campo elétrico crítico e a resistividade do solo

Mais uma análise está representada na Figura 7, a qual indica que o tempo para ocorrência da ruptura apresenta uma ampla dispersão (intervalo inferior a  $1 \mu s$  até mais de  $5 \mu s$ ). Considerando que apenas tempos de frente maiores do que  $1 \mu s$  foram testados, fica claro que o início do processo de ionização não requer um tempo elevado de injeção. Em geral, comportamento semelhante foi verificado para todas as amostras testadas.

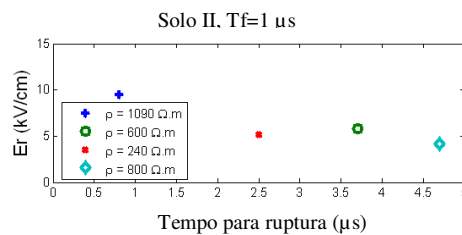


FIGURA 7 – Tempo para ocorrência de ruptura da amostra de solo

#### 4.2 Resultados para campo não-uniforme

Uma análise qualitativa a partir de curvas "VxI" apresentadas em (20) permitiria identificar a intensidade do processo de ionização no solo no espaço entre os cilindros coaxiais. Inicialmente, as curvas fechadas e arredondadas correspondem a valores de pico de baixa intensidade do campo elétrico (associada a baixos picos de corrente), com perfil típico da resposta impulsiva de um circuito paralelo RC com parâmetros constantes. Esse comportamento indica inexistência do processo de ionização ou de efeito de ionização muito fraco. Com o aumento do valor de pico de campo começa, o efeito do processo torna-se visível, com a extremidade superior da curva tendendo a se afinar. As curvas ascendentes e descendentes tendem a se sobrepor nesta região, indicando

o efeito de uma moderada ionização. Finalmente, quando o processo se torna intenso, com efeito pronunciado, a curva tende à forma de um “8” inclinado. Este resultado qualitativo são compatíveis por aqueles apresentados por Visacro em [11], onde a variação da inclinação da curva devido à ionização foi utilizada para modelar o efeito de ionização através de um aumento equivalente do raio interno do eletrodo e para, em seguida, calcular a diminuição da impedância impulsiva dos eletrodos de aterramento em aplicações de cabos contra-peso em linhas de transmissão.

Uma análise complementar de natureza quantitativa foi desenvolvida com base na interpretação das curvas de impedância transitória ao longo da escala de tempo, tais como as da figura 5. O efeito de ionização foi modelado como a expansão do raio do eletrodo interno. O raio "expandido"  $R_{exp}$  foi calculado a partir da diminuição da impedância da amostra coaxial de solo em relação ao seu valor original  $Z_o$  (para o raio interior  $R_o$  e raio externo  $R_{ext}$ ) correspondente à primeira curva (em azul) na Figura 8 para a impedância  $Z_d$  obtida associada ao raio interior expandido  $R_{exp}$  (correspondente à outra curva de impedância, como a curva em vermelho), expressão (1).

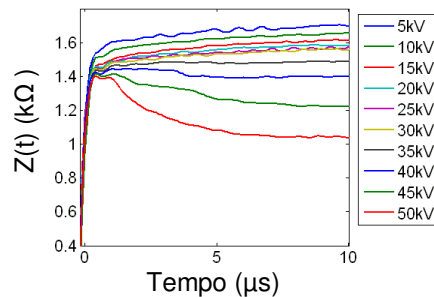


FIGURA 8 – Conjunto de curvas de impedância transitória de amostra do solo em função da tensão aplicada solo I , 600  $\Omega$ .m, tempo de frente: 1  $\mu$ s

$$\frac{Z_d}{Z_o} = \frac{\ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{exp}}\right)}{\ln\left(\frac{R_{ext}}{R_o}\right)} \Rightarrow \frac{Z_d}{Z_o} = \frac{\ln R_{ext} - \ln R_{exp}}{\ln R_{ext} - \ln R_o} \quad (1)$$

Para ilustrar esse procedimento, a Tabela 2 mostra o raio expandido calculado para a amostra da figura 8. Um procedimento semelhante foi aplicado para determinar esse raio expandido para todas as amostras testadas.

TABELA 2 – Raio expandido " $R_{exp}$ " calculado de (1)  
Solo de 600  $\Omega$ .m , Tempo de frente de corrente: 1  $\mu$ s –  $Z_o = 1,7$  k $\Omega$

$Z_d$ [k $\Omega$ ]	1,65	1,61	1,58	1,56	1,55	1,49	1,40	1,22	1,05
$R_{exp}$ [cm]	0,80	0,86	0,92	0,95	0,97	1,10	1,31	1,90	2,67

Outra análise foi desenvolvida a partir dos resultados calculados para o raio expandido. Verificou-se que a ionização tem distribuição fortemente não-uniforme, sendo composta principalmente por um grande número de canais ionizados que se desenvolve a partir condutor cilíndrico interior. Alguns destes canais estendem-se para muito além da região ionizada. Este processo é bastante diferente do efeito corona no ar que desenvolve uma camada (coroa) uniforme e bem definida em torno do eletrodo.

A partir de uma perspectiva macroscópica, parece razoável admitir-se que o raio expandido defina a fronteira média da região ionizada no solo. Assim, o campo elétrico calculado nesta fronteira corresponderia ao campo elétrico crítico. Com tal pressuposto, determinou-se o campo elétrico crítico a partir do raio expandido calculado, como uma função deste raio para todas as amostras testadas. A Tabela 3 mostra os resultados para os dados da Tabela 2.

TABELA 3 – Campo elétrico crítico  $E_c$  como função do raio expandido  $R_{exp}$   
Raio do condutor interior: 0,72 cm – Solo I - de 600  $\Omega$ .m e Tempo de frente e corrente: 1  $\mu$ s -  $Z_o = 1,7$  k $\Omega$

$R_{exp}$ [cm]	0,80	0,86	0,92	0,95	0,97	1,10	1,31	1,90	2,67
$E_c$ [kV/cm]	3,12	4,22	5,38	6,63	7,87	8,66	8,82	7,80	7,23

### 4.3 Análise Geral

A análise mais interessante foi desenvolvida considerando-se a dinâmica do campo elétrico crítico nos testes com campo de distribuição não uniforme, comparada ao resultado obtido para o campo elétrico crítico da mesma amostra na condição de distribuição de campo uniforme. A Figura 9 ilustra esta dinâmica e representa aproximadamente um perfil típico observado em todas as amostras testadas.

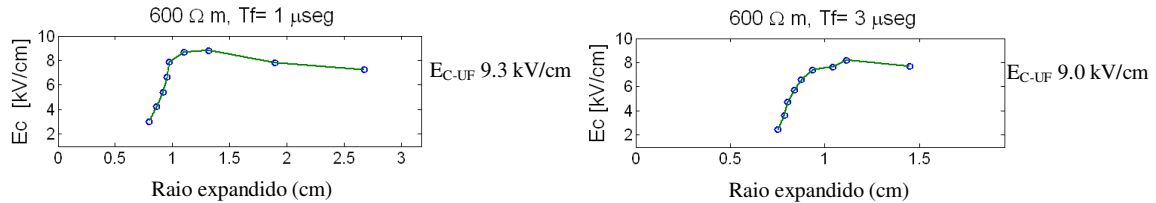


FIGURA 9 – Perfil do campo elétrico crítico em função da expansão do raio da região ionizada  
-  $E_{C-UF}$ : campo crítico em condições de solo uniforme - solo I, 600 Ω.m, TF = 1 μs

Apesar de os resultados mostrarem naturalmente certa dispersão, a tendência geral observada nesta figura para o solo I ocorre para todas as amostras do solo. Tipicamente, o valor calculado de  $E_c$  é muito reduzido para o raio de uma zona ionizada perto da fronteira do raio interior do condutor, em torno de 0,3 MV/m. Este valor é sugerido por diversos autores como o valor recomendado para o campo elétrico crítico [10, 17, 18]. No entanto, quando o raio da fronteira da região ionizada é aumentado, há um aumento substancial do valor de  $E_c$ . Antes do raio expandido se tornar o dobro do raio interior do condutor, o valor de  $E_c$  se aproxima de 0,8 MV/m. Em seguida, ele oscila, tendendo para um valor em torno do campo elétrico crítico medido no campo de distribuição uniforme, que está na faixa sugerida por Oettlé (~ 0,8 a 0,9 MV/m) [9]. Foram verificadas exceções a este comportamento apenas no caso de solos extremamente úmidos.

De acordo com o comportamento típico ilustrado na Figura 9, a influência da não-uniformidades do solo parecem ser responsável por reduzir o valor do campo crítico. Quanto menor for o raio estendido, menor o campo crítico. Este resultado é coerente com as conclusões de Loboda [7], que relatou que o campo crítico aumenta com o aumento do raio interno do eletrodo.

Este perfil de campo elétrico sugere nova interpretação para a questão do campo elétrico crítico. Não se trata mais de uma questão de "qual o valor se recomenda para este", mas da necessidade de se computar um comportamento dinâmico do campo elétrico crítico. Este campo crítico teria valor muito baixo, em torno de 200 a 300 kV/m, na região próxima ao eletrodo (raio expandido menor do que 0,8 cm) que evoluiria rapidamente para valor bem superior, em torno de 0,8 a 0,9 MV/m na região determinada por um raio expandido maior que 1,2 cm.

Este perfil dinâmico tem impacto significativo na redução da impedância de aterramento devido ao efeito de ionização em relação à redução esperada na hipótese de um valor constante para o campo elétrico crítico, como o efeito é comumente tratado nos procedimentos recomendados pela literatura. O cômputo dessa dinâmica para o campo crítico implica menor efeito de ionização, o que significa que a impedância de aterramento reduz-se menos do que se supõe.

### 5.0 - SUMÁRIO DAS CONCLUSÕES

Os resultados experimentais deste trabalho mostraram que, embora haja uma grande dispersão dos valores medidos ou calculados de acordo com o tipo de solo e de outros parâmetros, são observadas tendências claras, o que leva a algumas conclusões pertinentes que estão resumidas a seguir.

Em primeiro lugar, os valores típicos encontrados para o campo elétrico crítico numa distribuição de campo uniforme e não uniforme são consistentes, respectivamente, com aqueles apresentados nas mais importantes referências na literatura, respectivamente, da ordem de 0,8 a 0,9 MV/m (Oettlé [9]) e 0,2 a 0,3 MV/m (vários autores [10, 17, 18]). Ficou evidente que os campos críticos em condições de campo uniforme são bem mais elevados, cerca de 3 a 4 vezes maiores.

Verificou-se que para a distribuição de campo uniforme, o aumento da resistividade do solo promove o aumento do campo elétrico crítico, embora este efeito não seja observado para os valores menores deste parâmetro encontrado na distribuição de campo não uniforme.

Outra conclusão relevante é que o tempo de ruptura, parâmetro que traduz o tempo de início do efeito de ionização, é uma variável aleatória, sendo inferior a 1 μs em vários casos. Este fato contraria a hipótese usualmente indicada na literatura de considerar esse tempo maior do que 5 μs.

A conclusão mais relevante deste trabalho é a constatação de um comportamento dinâmico para o campo elétrico crítico em função da fronteira da zona ionizada, enquanto esta zona é expandida devido ao crescimento da corrente injetada. Segundo este resultado, a questão relevante deixaria de ser "qual o valor se empregar para o campo crítico" e passaria a ser "o cômputo do comportamento dinâmico do campo crítico". Este campo crítico tem um valor muito baixo em torno de 200 a 300 kV/m na região próxima ao eletrodo (raio expandido menor do que 0,8 cm) que evolui rapidamente para um valor maior em torno de 0,8 a 0,9 MV/m na região determinada por um raio expandido maior que 1,2 cm.

A implicação prática de computar tal comportamento dinâmico é uma diminuição significativa da redução da impedância de aterramento devido ao efeito de ionização em relação à redução esperada com o pressuposto de um valor constante de campo elétrico crítico de cerca de 300 MV/m, como recomendado na literatura [10,17,18].

## 6.0 - REFERÊNCIAS

- (1) BELLASCHI, P.L., "Impulse and 60-cycle Characteristics of Driven Grounds", AIEE Transactions, Vol.60, p.123-128, março, 1941.
- (2) BELLASCHI, P. L., ARMINGTON, R. E., SNOWDEN, A. E., "Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds - II", AIEE Transactions, Vol.61, p.349-363, 1942.
- (3) BELLASCHI, P. L., ARMINGTON, R. E., "Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds - III", AIEE Transactions, Vol.62, p.334-345, 1943.
- (4) LIEW, A. C., DARVENIZA, B. E., "Dynamic Model of Impulse Characteristic of Concentrated Earths", Proc IEEE, Vol 121, No2, fevereiro, 1974.
- (5) LOBODA, M., POCHANKE, Z., "A Numerical Identification of Dynamic Model Parameters of Surge Soil Conduction Based on Experimental Data", 21st ICLP Proceedings, Berlin, p. 139-143, setembro, 1992.
- (6) LOBODA, M., POCHANKE, Z., "Current and Voltage Distribution in Earthing. A Numerical Simulation Based on the Dynamic Model of impulse Soil Conductivity", 20th ICLP Proceedings, Interlaken, Suíça, p. 3.13P, setembro, 1990.
- (7) LOBODA, M., SCUKA, V., "On The Transient Characteristics of Electrical Discharges and Ionization Processes in Soil", 23rd International Conference on Lightning Protection Proceedings, Itália, p.539-544, setembro, 1996.
- (8) OETTLÉ, E. E., "A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 3, No. 4, p. 2020-2029, outubro, 1988.
- (9) OETTLÉ, E. E., "The Characteristics of Electrical Breakdown and Ionization Processes in Soil", The Transactions of the SA Institute of Electrical Engineers, p. 63-70, dezembro, 1988.
- (10) MOUSA, A. M., "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 9, No 3, julho, 1994.
- (11) VISACRO, S.F., SOARES, A.J., "Sensitivity Analysis for the Effect of Lightning Current Intensity on the Behavior of Earthing Systems", XXII-ICLP Proceedings (International Conference on Lightning Protection) , Budapest, Hungary, September 1994.
- (12) LIU, Y., THEETHAYI, N., GONZALEZ, R. M., THOTTAPPILLIL, R., "The Residual Resistivity in Soil Ionization Region Around Grounding System for Different Experimental Results", IEEE, 2003
- (13) VISACRO, S., "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Transactions on Power Delivery. , v.22, p.381 - 386, 2007.
- (14) VISACRO, S., "Lightning: An Engineering Approach", pp. 1- 276 - In Portuguese, ArtLiber Edit., São Paulo - Brazil, 2005.
- (15) VISACRO, S., "Grounding and Earthing: Basic Concepts, Measurements and Instrumentation, Grounding Strategies", (in Portuguese), 2nd ed., São Paulo – Brazil: ArtLiber Edit., pp. 1-159, 2002.
- (16) VISACRO, S., Rosado G., "Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: an Experimental Evaluation", accepted for publication on IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, October 2008.
- (17) GONOS, I. F., STATHOPOULOS, I. A., "Soil Ionisation Under Lightning Impulse Voltages" IEE Proc.-Sci Meas. Technol., Vol 151, No 5, setembro, 2004.
- (18) NOR, M. N., "Review: Soil Electrical Characteristics Under High Impulse Currents", Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol 48, p. 826-829, novembro, 2006.
- (19) KUFFEL, E., ZAENGL, W. S., "High-Voltage Engineering: Fundamentals" , São Paulo, Pergamon Editora, 2000.
- (20) LIMA, J. L. C. ,VISACRO,S., , "Experimental developments on soil ionization: new findings", GROUND'2008 & 3<sup>rd</sup> LPE Proceedings (International Conference on Grounding and Earthing & I. C. on Lightning Physics and Effects) , Florianopolis, Brasil, novembro, 2008.