



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**ATUALIZAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS DE CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS MEDIDAS NA
ESTAÇÃO MORRO DO CACHIMBO**

Silvério Visacro(*) Cláudia R. Mesquita Marcela P. P. Batista Listz S. Araújo
LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

Parâmetros de ondas de correntes de descargas atmosféricas negativas medidas recentemente na Estação de pesquisa do Morro do Cachimbo são considerados neste informe técnico e comparados aos dados estatísticos de correntes medidas na estação durante um período anterior de 13 anos. É avaliado o impacto dos parâmetros derivados destas recentes medições nos valores medianos da amplitude de corrente, dos tempos de frente e do tempo de meia onda da corrente.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas atmosféricas, Correntes de descargas atmosféricas, Parâmetros de correntes de raios, Estatísticas de parâmetros de correntes de descargas atmosféricas.

1.0 – INTRODUÇÃO

Sabe-se que a maioria dos prejuízos originados das descargas atmosféricas são causados fundamentalmente pelo fluxo da corrente de retorno para o solo. Desta forma, o conhecimento dos parâmetros da corrente é de fundamental importância para a engenharia de proteção contra os efeitos do fenômeno.

A maioria dos dados disponíveis sobre os parâmetros das correntes de descargas foram obtidos a partir de medições realizadas em torres instrumentadas instaladas em regiões temperadas, no Hemisfério Norte. Considerando a possível influência dos aspectos regionais nos parâmetros medidos, a necessidade de referências de práticas de proteção contra descargas especificamente para as regiões tropicais exigiu dados de medições locais.

2.0 – HISTÓRICO

Nesta perspectiva, um programa de investigação experimental tem sido realizado no Brasil desde 1971, a fim de fornecer dados para a caracterização local de parâmetros de correntes. A ação mais importante desse programa foi a instalação de uma torre instrumentada localizada na Estação do Morro do Cachimbo (MC), nas proximidades da Capital Belo Horizonte-MG, em 1985, Figura 1. Duas bobinas de Pearson, instaladas na base da torre, são utilizadas para medir as correntes que incidem no mastro de 60 metros de altura sustentado por cabos isolantes.

Passados 13 anos de operação, uma quantidade significativa de dados foi obtida na estação, compreendendo registros de 157 correntes de retorno de descargas negativas descendentes medidas na torre. Tal banco de dados foi discutido em detalhes e as estatísticas correspondentes foram resumidas e apresentadas na referência (1), focando nos parâmetros relacionados a frente da onda de corrente. A amplitude da corrente, a duração e a inclinação da frente de onda foram comparados aos valores tradicionalmente apresentados na literatura (2, 3, 4, 5 e 6). As distribuições de frequência acumulada e os coeficientes de correlação entre os parâmetros foram

(*) Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha – CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil
Tel: (+55 31) 3409-4872 – Fax: (+55 31) 3409-5455 – Email: LRC@cpdee.ufmg.br

determinados. Além disso, avaliou-se também alguns outros parâmetros específicos, tais como a duração da onda (tempo para a metade do valor de pico), a energia específica e a carga (do impulso).



FIGURA 1 – Vista da Estação de pesquisa de descargas atmosféricas do Morro do Cachimbo com seu mastro de 60 m de altura e seu abrigo blindado.

O principal resultado derivado do trabalho mencionado foi a obtenção do valor mediano (e da média geométrica) da amplitude das correntes medidas na torre em cerca de 50% e 30% maior do que os valores das referências de Berger, respectivamente para as primeiras correntes e para as correntes subsequentes medidas na parte superior da torre (2 e 3). Esses valores medianos foram respectivamente 45 kA e 16 kA em relação aos valores de Berger, 30 kA e 12 kA.

Posteriormente, baseado na aplicação de um modelo eletromagnético preciso, Visacro e Silveira em (8) mostraram que, para uma torre de altura reduzida como a da estação MC, as medições de amplitudes de correntes obtidas na parte superior ou na parte inferior do mastro chegaria basicamente ao mesmo resultado para os típicos tempos de frente das primeiras correntes e das correntes subsequentes. Desta forma, a significativa diferença mencionada entre as amplitudes de correntes não pode ser explicada pelo posicionamento dos transdutores de corrente ao longo da torre.

3.0 – SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Nas medições realizadas na estação MC, até 1998, os sinais fornecidos pela saída das duas bobinas de Pearson eram capturados por dois osciloscópios, onde as formas de ondas eram gravadas com um intervalo de amostragem de 50 ns. O nível de disparo era de 800 A. A fase impulsiva de cada corrente de retorno, usualmente registrada numa janela de 400 μ s, e um mecanismo de disparo individual eram responsáveis pela activação do registo de cada pulso de corrente, limitado a um número máximo de 16 correntes de retorno por descarga.

Recentemente, todo o sistema de medição da estação MC foi atualizado, passando a ter um novo sistema de aquisição, digitalização e armazenamento dos registros de corrente. Duas novas bobinas de Pearson responsáveis pela medição de correntes de descargas na faixa de 20 A a 200 kA foram instaladas na base do mastro. Uma delas é dedicada ao registro de correntes de baixa amplitudes, inferior a 5 kA. Os transdutores de corrente alimentam uma placa de aquisição de 8 canais de 12 bits, com uma taxa de amostragem de 60 MS / s. Para cada corrente superior a 60 A fluindo ao longo da torre, um registro contínuo de 1 s é gravado com uma resolução temporal de 33 ns e 30 ms de período pré-disparo. Opcionalmente, este sistema pode ser ajustado para gravar registros de 0,5 s de duração com uma resolução de 17 ns e 15 ms de período pré-disparo.

O novo sistema de medição é capaz de gravar em detalhes a descarga plena, incluindo as ondas impulsivas da primeira corrente e das correntes subsequentes, a parte inicial da subida da onda de corrente e as fases que precedem os pulsos das correntes de retorno. Na fase precedente das correntes de retorno são gravados os pulsos de correntes induzidos na torre em resposta aos canais precursores da descarga que se aproximam do solo.

A Figura 2, adaptada de uma publicação recente dos autores (9), ilustra tais características para um registro específico de uma primeira corrente de uma descarga plena composta por sete correntes de retorno medidas em 2009. As novas facilidades de medição permitem explorar diferentes janelas de tempo e de amplitude de corrente, revelando detalhes das correntes medidas. Um registro completo de 1 segundo foi gravado em duas escalas de corrente, 9 kA e 200 kA. A Figura 2 (a) mostra seis correntes de retorno de tal descarga em uma janela de

0,5 segundo. As Figuras 2(b) e 2(c) mostram os detalhes da forma de onda impulsiva da primeira corrente e do início da subida da onda, onde se observa a máxima derivada temporal próximo à metade do valor de pico da onda. As Figuras 2(d) e 2(e) referem-se aos pulsos de correntes precedentes da corrente de retorno que correspondem aos deslocamentos de elétrons para baixo na torre, em resposta à aproximação do solo do canal precursor da descarga. Tais pulsos são mostrados em diferentes janelas de tempo e de amplitude de corrente ilustrando detalhes, tais como o valor de pico, o tempo de frente e duração dos pulsos.

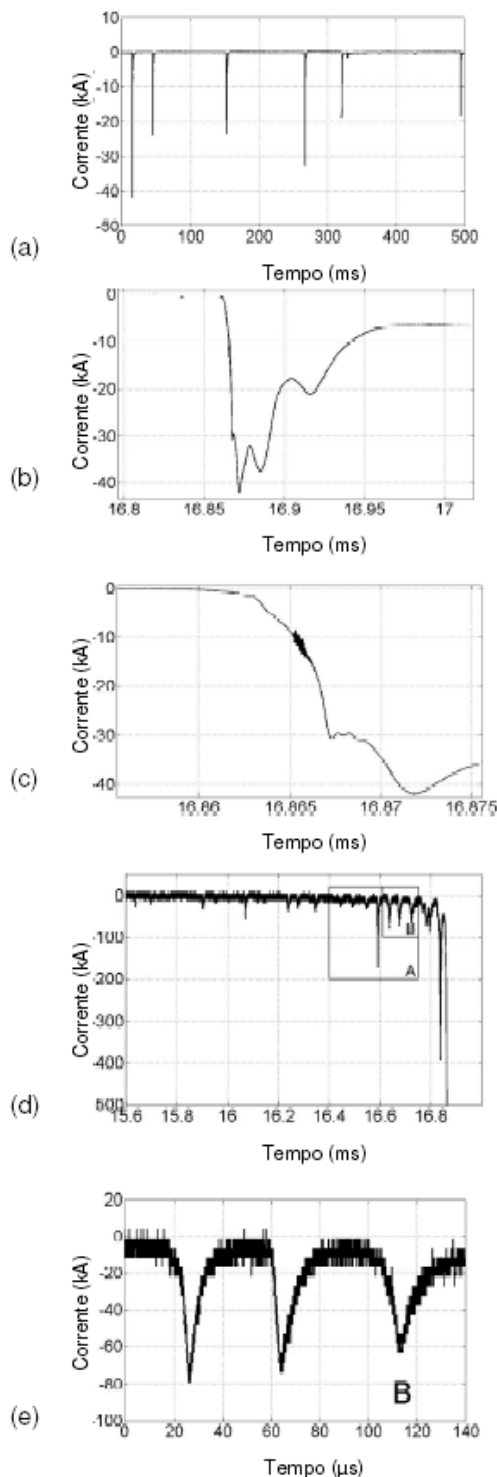


FIGURA 2 – Registro de corrente de descarga medida na estação MC em diferentes escalas de tempo e amplitude. Figura adaptada de (9).

Desde a melhoria do sistema de medição, correntes de várias descargas incidentes na torre têm sido medidas. Em particular, os registros das temporadas de tempestades dos anos 2008, 2009 e início de 2010 apresentam boa qualidade e estão disponíveis para complementar as estatísticas de correntes medidas na estação MC.

Este informe técnico apresenta esta avaliação complementar e algumas considerações sobre uma possível redução da mediana da amplitude de corrente, tal como aconteceu com os dados das medições realizadas no Sul da África, ao se estender a prévia base de dados (4, 5). Esta questão tem revelado na hipótese de uma influência regional sobre a amplitude da corrente.

4.0 – RESULTADOS DE MEDIÇÕES RECENTES DE CORRENTES DE RETORNO

Nas temporadas de chuvas (anos 2008, 2009 e início de 2010), 19 registros de excelente qualidade foram obtidos, correspondendo a sete descargas plenas. Os parâmetros das correntes de retorno de grande interesse para proteção contra descargas são apresentados na Tabela 1 e 2. Na ausência de medição direta da derivada máxima de corrente na estação MC, optou-se por apresentar com maior confiabilidade a inclinação média da frente correspondente ao parâmetro de tempo T30 (S30). O conjunto completo de amostras compreende 7 primeiras correntes e 12 correntes subsequentes.

A Tabela 1 mostra os parâmetros de sete descargas negativas, sendo quatro descargas contendo múltiplas correntes de retorno e três descargas únicas. O percentual de descargas múltiplas é semelhante ao do estudo anterior, 57% contra 52% da referência (1).

TABELA 1 – Primeiras correntes de retorno de descargas negativas

Descarga	Data	Nº correntes de retorno (na torre)	Amplitude da corrente (kA)	T10 (µs)	T30 (µs)	T50 (µs)	S30 (kA/µs)	Carga (C)	$\int I^2 dt$ Energia (A².s) x10⁴
F1	01/02/08	1	-153	15,25	7,13	159,77	12,87	19,67	213,62
F2	24/02/08	4	-14	0,30	0,23	8,68	36,00	0,13	0,10
F3	31/10/08	9	-47	6,12	4,15	125,1	6,80	7,78	17,25
F4	24/03/09	3	-30	2,92	0,85	17,23	21,18	7,58	4,20
F5	07/10/09	7	-42	3,65	1,93	32,68	13,03	5,62	6,99
F6	19/12/09	1	-45	3,40	2,00	71,35	13,50	5,44	10,09
F7	22/01/10	1	-52	6,00	2,50	123,05	12,48	8,44	24,56

Na Tabela 1 destaca-se dois acontecimentos não usuais: primeiro, uma corrente cuja amplitude é muito elevada (- 153 kA) com tempos de frente muito longos (como exemplo, T10 em cerca de 15,25 µs); Segundo, um evento de baixa amplitude (-14 kA) com tempos de frente bem reduzidos. De fato, foi verificada por correlação com os registros do Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas local que este último evento mencionado corresponde a uma segunda corrente de uma descarga múltipla, cuja primeira corrente de retorno teve sua incidência nas proximidades da torre. Isso explica os reduzidos parâmetros de tempo desta corrente (T30 em torno de 0,30µs e T50 em torno de 8,68 µs).

Algumas correntes de retorno subsequentes não foram incluídas no conjunto de amostras analisadas na Tabela 2, uma vez que seus registros não apresentam qualidade tão boa quanto as demais.

TABELA 2 – Correntes de retorno subsequentes

Descarga	Corrente de Retorno	Amplitude da corrente (kA)	T10 (µs)	T30 (µs)	T50 (µs)	S30 (kA/µs)	Carga (C)	$\int I^2 dt$ Energia (A².s) x10⁴
F2	2ª	-30	0,98	0,73	7,90	24,55	0,34	0,46
F2	3ª	-12	0,18	0,15	1,98	48,00	0,04	0,02
F2	4ª	-22	0,30	0,15	3,33	88,00	0,16	0,13
F3	2ª	-17	1,70	0,78	8,62	13,02	1,85	0,74
F3	3ª	-33	0,30	0,13	15,88	148,50	2,06	2,34
F4	2ª	-65	2,08	0,48	----	80,69	6,43	4,02
F4	3ª	-23	0,28	0,18	3,15	75,27	0,56	0,26
F5	2ª	-25	0,25	0,20	34,18	75,00	6,37	4,96
F5	3ª	-24	0,47	0,28	593,75	44,47	15,50	17,77
F5	4ª	-34	0,35	0,23	20,93	87,43	12,53	17,18
F5	5ª	-21	0,30	0,27	11,10	47,25	1,20	0,69
F5	7ª	-19	0,38	0,33	33,00	34,20	1,08	0,84

O conjunto de amostras corresponde a pouco mais de 20% do número de amostras analisadas na referência (1). Apesar do número reduzido de amostras, as estatísticas foram levantadas para estes novos dados e são indicadas na Tabela 3.

TABLE 3 – Estatísticas das medições recentes de correntes de descargas

Parâmetro	Tamanho da Amostra	Média Geométrica	Média Aritmética	Mediana
<i>Primeiras Correntes</i>				
T10 (μs)	7	3,47	5,38	3,65
T30 (μs)	7	1,78	2,69	2,00
I_p (kA)	7	43,54	54,71	45,00
T50 (μs)	7	50,68	76,84	71,35
S30 (kA/ μs)	7	14,67	16,55	13,03
Carga (C)	7	4,54	7,81	7,58
Energia ($\text{A}^2 \cdot \text{s}$) $\times 10^4$	7	8,28	39,54	10,09
<i>Correntes subsequentes</i>				
T10 (μs)	12	0,45	0,63	0,33
T30 (μs)	12	0,27	0,33	0,25
I_p (kA)	12	24,80	27,08	23,50
T50 (μs)	10	8,79	13,91	9,86
S30 (kA/ μs)	12	53,69	63,86	61,50
Carga (C)	10	0,87	2,01	1,14
Energia ($\text{A}^2 \cdot \text{s}$) $\times 10^4$	10	0,6	1,45	0,71

Os desvios são menos significativos para os parâmetros de frente das ondas de correntes subsequentes, provavelmente devido ao maior número de amostras que reduz o seu impacto. Todos os parâmetros foram incluídos nas estatísticas. Na primeira base de dados, não foi possível detectar alguns detalhes, tais como a classificação errônea da primeira corrente da descarga F2, já que não havia sistema de detecção e localização de raios instalado naquele momento a fim de permitir a correta identificação da ordem das correntes de retorno.

Vale ressaltar que, as primeiras descargas atípicas não afetam significativamente as estatísticas. Pode-se dizer que o efeito dos parâmetros de amplitude de 153 kA e 14 kA compensam-se mutuamente. Quanto às descargas subsequentes, desconsiderou-se duas ondas de correntes atípicas (3a e 4a correntes de retorno da descarga F5, Tabela 2) na obtenção das estatísticas dos parâmetros T50, Carga e Energia. Tais parâmetros das duas ondas de corrente não usuais mencionadas apresentam influência significativa sobre as estatísticas.

5.0 – ATUALIZAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS DE CORRENTES DE DESCARGAS MEDIDAS NA ESTAÇÃO MC CACHIMBO

Após analisar os dados das recentes correntes medidas, foi realizado o levantamento estatístico do conjunto de amostras que inclui os dados do estudo anterior (1) e das novas correntes, como é indicado nas Tabelas 4 e 5. Os parâmetros estatísticos da base de dados conjunta são indicados em primeiro lugar. Os mesmos parâmetros encontrados no estudo anterior (1) são indicados entre parênteses.

TABELA 4 – Estatísticas das primeiras correntes de retorno.

Parâmetro	Tamanho da amostra * (**)	Aproximação pela distribuição lognormal		Percentual de casos que não excedem o valor tabelado		
		Média Geométrica	σ_{\log}	5%	50%	95%
T10 (μs)	38 (31)	5,1 (5,6)	0,62 (0,36)	1,9 (3,1)	5,1 (5,6)	13,9 (9,9)
T30 (μs)	38 (31)	2,6 (2,9)	0,63 (0,44)	1,0 (1,4)	2,6 (2,9)	7,4 (5,9)
I_p (kA)	38 (31)	45,0 (45,3)	0,46 (0,39)	21,3 (24,0)	45,0 (45,3)	94,1 (85,2)
T50 (μs)	38 (31)	52,9 (53,5)	0,72 (0,62)	16,3 (19,7)	52,9 (53,5)	169,2 (145,2)
S30 (kA/ μs)	38 (31)	9,3 (8,4)	0,41 (0,30)	4,8 (5,1)	9,3 (8,4)	18,1 (13,7)
Carga (C)	38 (31)	5,0 (5,2)	0,80 (0,5)	1,4 (2,3)	5,0 (5,2)	18,8 (11,6)
Energia ($\text{A}^2 \cdot \text{s}$) $\times 10^4$	38 (31)	10,198 (10,707)	1,24 (0,88)	1,33 (2,58)	10,2 (10,71)	78,22 (44,43)

NOTA: * 31 amostras + 7 novas amostras. ** Somente 31 amostras.

TABLE 5: Estatísticas de correntes de descargas subsequentes

Parâmetro	Tamanho da amostra * (**)	Aproximação pela distribuição lognormal		Percentual de casos que não excedem os valores tabelas		
		Média Geométrica	σ_{\log}	5%	50%	95%
T10 (μ s)	71 (59)	0,6 (0,7)	0,76 (0,74)	0,2 (0,2)	0,6 (0,7)	2,2 (2,3)
T30 (μ s)	71 (59)	0,4 (0,4)	0,69 (0,70)	0,12 (0,12)	0,4 (0,4)	1,2 (1,2)
I_p (kA)	71 (59)	17,5 (16,3)	0,52 (0,51)	7,5 (7,0)	17,6 (16,3)	41,3 (37,7)
T50 (μ s)	71 (59)	16,0 (16,4)	1,28 (1,23)	2,0 (2,2)	16,0 (16,4)	128,4 (122,3)
S30 (kA/ μ s)	71 (59)	28,2 (24,7)	0,73 (0,68)	8,4 (8,1)	28,2 (24,7)	93,2 (75,0)
Carga (C)	71 (59)	1,05 (0,99)	1,28 (1,15)	0,13 (0,15)	1,05 (0,99)	8,51 (6,60)
Energia ($A^2.s$) $\times 10^4$	71 (59)	0,691 (0,634)	1,63 (1,54)	0,048 (0,051)	0,691 (0,634)	9,780 (7,888)

NOTA: * 59 amostras + 12 novas amostras. ** Somente 59 amostras.

6.0 – DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Como mencionado anteriormente, o número das novas amostras corresponde a pouco mais de 20% do número de amostras do prévio banco de dados (7 primeiras correntes contra 31 e 12 correntes subsequentes contra 59). Portanto, não se espera que o impacto dos parâmetros das novas amostras seja significativo.

O valor mediano da amplitude de corrente (45 kA) é um pouco menor em relação aos 45,3 kA do estudo anterior e tal valor é consistente com a mediana obtida somente para as novas correntes. Diferentemente, para as descargas subsequentes, a mediana é acrescida de 16,3 kA (primeiro estudo) para 17,6 kA, sendo que o valor mediano das amplitudes das novas correntes subsequentes é muito maior, 23,5 kA.

As medianas de ambos os parâmetros de frente de onda (T10 e T30) das novas primeiras correntes são significativamente menores, o que resultou na diminuição de cerca de 10% da mediana dos tempos de frente em relação às medianas do estudo anterior. Este resultado pode ser parcialmente atribuído à melhoria da resolução temporal nas novas medidas, que permite determinar com mais precisão os tempos de frente. A mediana do tempo de meia onda das recentes primeiras correntes é significativamente maior do que a do estudo anterior, no entanto a média geométrica é semelhante. Os valores medianos de todos os parâmetros de tempo das recentes correntes subsequentes são menores (excluindo T50 das duas formas de ondas atípicas) e isso acarretou na redução dos valores medianos em relação aos resultados do estudo anterior.

Apesar do número reduzido de amostras, algumas tendências foram observadas e são comentados a seguir:

As primeiras correntes parecem preservar o valor mediano da amplitude de corrente em torno de 45 kA, enquanto que a mediana das amplitudes de correntes subsequentes parecem ter uma tendência no aumento de seu valor.

Os parâmetros de tempo, principalmente os tempos de frente, parecem apresentar uma tendência na redução dos valores medianos.

No entanto, vale ressaltar que estas tendências ainda necessitam de confirmação com base em um número maior de amostras.

Os autores pretendem continuar trabalhando na obtenção de um maior número de medições nos próximos anos a fim de permitir a elaboração de conclusões confiáveis sobre a eventual influência regional sobre os parâmetros de corrente de descargas atmosféricas.

7.0 – AGRADECIMENTOS

Cláudia Rejane de Mesquita agradece à FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio financeiro.

8.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VISACRO, S., SCHROEDER, M.A.O., SOARES JR., A., CHERCHIGLIA L., L.C., de SOUZA, V. J. 2004. Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo Station. Journal of Geophysical Research. Vol. 109.
- (2) ANDERSON, R.B. and ERIKSSON, A.J. 1980. Lightning parameters for engineering application, Electra (69), 65– 102.
- (3) BERGER, K., ANDERSON, R.B. and KRÖNINGER H. 1975. Parameters of lightning flashes, Electra (41), 23– 37.

- (4) ERIKSSON, A. J. 1979. The lightning ground flash—An engineering study, Ph.D. thesis, Natl. Electr. Eng. Res. Inst., Pretoria, S. Afr.
- (5) ERIKSSON, A. J., GELDENHUYS, H. J. and BOURN, G. W. 1989. Fifteen years data of lightning measurements on a 60 m mast, Trans. South African Inst. Elect. Eng., 80(1), 98–103.
- (6) HEIDLER, F., CVETIC, J.M. and STANIC, B.V. 1999. Calculation of lightning current parameters, IEEE Trans. Power Delivery, 4(2), 399–404A.
- (7) RAKOV, V, UMAN, M.A. 2003. Lightning – Physics and Effects, Cambridge Univ. Press, New York.
- (8) VISACRO, S. and SILVEIRA, F.H. 2005. Lightning current waves measured at short instrumented towers: The influence of sensor position, Geophysical Research Letters. Vol. 32, L18804, Doi:10.1029/2005gl023255, 2005
- (9) VISACRO, S., VALE, M. H. M., TEIXEIRA, A. N., CORREA, G. M. 2010. The early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes. Accepted for publication on the Journal of Geophysical Research. 2010JD014097.
- (10) VISACRO, S., MESQUITA, C.R., DE CONTI, A., SILVEIRA, F.H., Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station, submitted to the Journal of *Atmospheric Research* in January 2011.

8.0 – DADOS BIOGRÁFICOS



Silvério Visacro nasceu em Belo Horizonte em 1956. Graduiu-se (1979) e obteve o mestrado (1983) em Eng. Elétrica pela UFMG e doutorou-se na COPPE/UFRJ (1992). É Professor Titular da UFMG na área de Eng. Elétrica em Eletromagnetismo Aplicado, com ênfase nas aplicações associadas às Descargas Atmosféricas e aos Aterramentos Elétricos. Em 2001, com o suporte da CEMIG constituiu o LRC - Lightning Research Center, avançado centro de pesquisa dos raios e seus efeitos, onde lidera equipe de 50 membros, dentre docentes, pós-doutorandos e alunos (doutorandos, mestrandos e de Iniciação Científica) na realização de pesquisas de alto nível. É autor de dois livros, respectivamente nos temas Aterramentos Elétricos e Descargas Atmosféricas, e de mais de 300 artigos (52 em periódicos). É um dos editores do Journal of Lightning Research e preside o GROUND & LPE: Intern. Conference on Grounding and Earthing & Lightning Physics and Effects. Atua no Comitê Científico de outros eventos internacionais da área: SICEL e SIPDA. Coordena a Rede Brasileira de Sobreensões Atmosféricas.