



**GRUPO X  
SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)**

**TECNOLOGIAS PARA ANÁLISE E MELHORIA DO DESEMPENHO DE INSTALAÇÕES DE  
TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

André Martins Carvalho\* Maurício de Souza Abreu Armando Cazetta Filho  
Aloísio Chaves de Carvalho Luiz Carlos Leal Cherchiglia José Henrique Diniz

**COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG**

**RESUMO**

O presente informe técnico descreve a experiência da CEMIG, através da Assessoria de Gestão Tecnológica e Energias Alternativas, na utilização de tecnologias de ponta para detectar, analisar e atenuar o impacto das descargas atmosféricas em suas instalações de transmissão, com conseqüente melhoria de seu desempenho.

**PALAVRAS-CHAVE**

Descargas Atmosféricas, Análise de Faltas, Sobretensões, Sistema de Localização de Tempestades

**1 - INTRODUÇÃO**

Em Minas Gerais, a atividade elétrica da atmosfera é bastante severa, sendo as resistividades dos solos também bastante elevadas (com valores médios de 2400  $\Omega$ .m, atingindo 20000  $\Omega$ .m em alguns locais). Essas condições ambientais adversas afetam o desempenho das instalações frente a descargas atmosféricas e conseqüentemente a qualidade da energia ofertada (1)(2).

Tendo em vista a necessidade crescente de energia de melhor qualidade e a constante busca de um atendimento cada vez melhor a seus clientes, a CEMIG tem investido recursos em novas tecnologias de software e hardware e esforços na implementação de instalações de pesquisa para melhor entender a interrelação entre as descargas atmosféricas e o desempenho operativo do seu sistema elétrico, com o

objetivo de desenvolvê-lo, aperfeiçoá-lo e otimizar seu desempenho.

A utilização intensiva de tecnologias é encarada pela CEMIG como um fator de diferenciação competitiva em sua permanente busca da excelência empresarial, como demonstram, principalmente, a Estação de Pesquisa de Parâmetros de Descargas Atmosféricas do Morro do Cachimbo, o Sistema de Localização de Tempestades, a rede de contadores de descargas atmosféricas e os atuais Sistemas Computacionais Georreferenciados de identificação de faltas e análise de desempenho.

**2 - DESEMPENHO DE LTs**

As descargas atmosféricas são a causa principal dos desligamentos não programados dos sistemas elétricos. As estatísticas internacionais atribuem às descargas atmosféricas cerca de 65% dos desligamentos das linhas de transmissão. O Estado de Minas Gerais, por causa de suas características geometeorológicas, apresenta índices bastante elevados; cerca de 70% dos desligamentos nas Linhas de Transmissão (sendo 20% permanentes). Nas linhas de 13,8 kV (Distribuição), os desligamentos devidos a descargas atmosféricas são da ordem de 30%.

O desempenho das LTs varia bastante dependendo das condições de projeto e ambientais do local onde a LT está inserida. Além disso, o desempenho varia de ano para ano, dependendo da incidência anual de descargas atmosféricas.

Em geral, é possível reduzir a um número aceitável os desligamentos das linhas devido às descargas atmosféricas, através de uma proteção mais adequada, com a instalação de cabos pára-raios, um dimensionamento criterioso do aterramento dos suportes e a utilização de pára-raios de ZnO, mesmo em locais com alta adversidade operacional (alta incidência de descargas e alta resistividade do solo).

Para avaliação da efetividade das melhorias implementadas em uma LT, tem sido necessária a utilização de novas ferramentas de análise, que permitem localizar virtualmente uma descarga causadora de uma falta em uma LT.

### 3 - UTILIZAÇÃO DE PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO ZINCO (ZnO) EM LTs

Quando as medidas convencionais para a melhoria de desempenho das LTs frente a descargas atmosféricas não surtem o efeito desejado, medidas não convencionais, como a utilização de pára-raios ZnO, podem ser adotadas dentro do contexto de custo/benefício que proporcionarão nesta melhoria.

A conexão de pára-raios de óxido de zinco diretamente nas linhas de transmissão é uma técnica que, ao longo dos últimos anos, tem sido pesquisada e já utilizada em diversos países, apresentando-se como uma alternativa importante na redução do número de desligamentos por descargas atmosféricas, principalmente para LTs situadas em regiões de alta resistividade do solo e elevada atividade elétrica da atmosfera.

A utilização dessa técnica apresenta particular interesse para linhas de 138 kV que, devido ao relativamente baixo nível de isolamento, registra muitas vezes, elevado número de desligamentos mesmo para valores relativamente baixos de resistência de pé de torre.

### 4 - DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM MG

Tendo em vista que o ambiente onde o sistema elétrico está inserido influencia diretamente em seu desempenho e consequentemente, na qualidade da energia ofertada, e devido às condições adversas de sua área de atuação, a CEMIG iniciou em 1971, através do Assessoria de Gestão Tecnológica e Energias Alternativas, um programa de levantamento da atividade elétrica da atmosfera no Estado, sendo desenvolvida, em paralelo, a observação sistemática do desempenho das instalações de seu sistema elétrico (1). Com as pesquisas realizadas pela CEMIG, foi obtido o mapa de curvas com isolinhas de densidade de descargas para a terra no Estado de Minas Gerais apresentado na Figura 1.

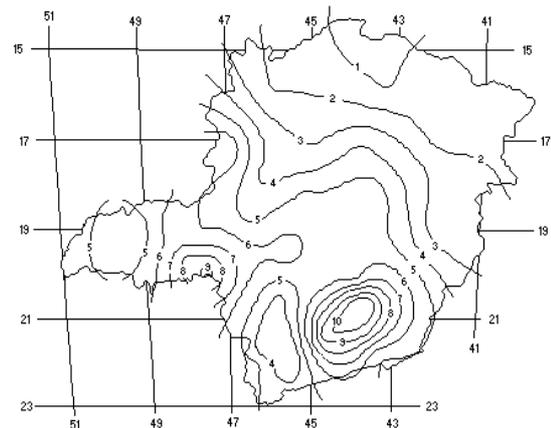
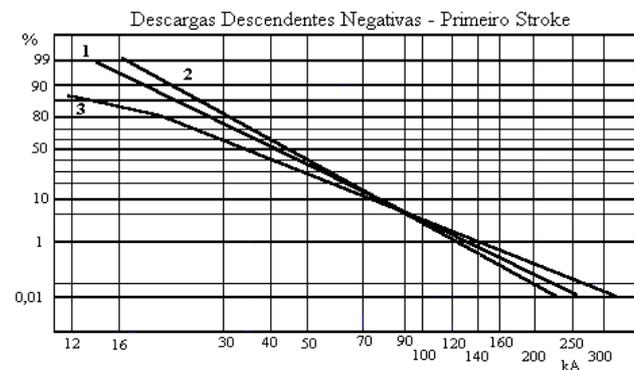


FIGURA 1 - Densidades de Descargas Atmosféricas para a Terra (descargas/km<sup>2</sup>/ano) - período 1985 a 1995

A Figura 2 apresenta a distribuição de frequência acumulada das intensidades de corrente máximas das descargas atmosféricas descendentes negativas registradas na estação do Morro do Cachimbo. Essas distribuições são utilizadas tanto no estudo de proteção de LTs contra descargas atmosféricas como nos cálculos de seu desempenho.

Observa-se nesse gráfico da Figura 2, que o valor da mediana ajustada das intensidades de corrente do primeiro "stroke" (43,1 kA) é de cerca de 27% superior ao valor de referência publicados pela CIGRÉ - (34 kA), o que vem confirmando a maior severidade das descargas atmosféricas em Minas Gerais.



- 1 - CEMIG: 32 descargas obtidas no Cachimbo, confirmadas como descendentes através de registros fotográficos e/ou pela forma de onda.
- 2 - CEMIG: 56 descargas negativas registradas no topo de suportes de LTs de 138 kV, Elos Magnéticos.
- 3 - CIGRÉ: curva de referência para descargas descendentes negativas [Ref. ELECTRA 69].

FIGURA 2 - Distribuições de Frequência Acumulada das Intensidades de Correntes das Descargas Atmosféricas

## 5 - SOBRETENSÕES

As sobretensões provocadas por descargas atmosféricas que aparecem em uma linha de transmissão estão relacionadas com o ponto de incidência das descargas. A Tabela 1 mostra que o número de descargas que atingem uma linha é diretamente proporcional à densidade de descargas atmosféricas do local e aumenta sensivelmente em trechos de LTs situadas em topo de morros.

TABELA 1 - Incidência de descargas

Ng (Desc./km <sup>2</sup> /Ano)	Número de descargas que atingem 100 km de LT por Ano	
	Terreno Plano/Ondulado	Terreno Montanhoso
1	13	24
5	65	120
10	130	240

Dependendo do local de incidência da descarga, podemos ter os seguintes tipos de sobretensão na linha:- sobretensão induzida, sobretensão por falha de blindagem e sobretensão por “backflashover”.

### 5.1 Sobretensão Induzida

Essa sobretensão aparece quando a descarga atinge o solo nas proximidades da linha e raramente excede 300 kV sendo, portanto, este mecanismo de descarga desprezível para linhas de tensão superior a 69 kV, cujo nível de isolamento é geralmente superior.

### 5.2 Sobretensão por Falha de Blindagem

Esse fenômeno é observado quando os cabos pára-raios não oferecem blindagem adequada aos condutores. Normalmente, as falhas de blindagem ocorrem no meio de vãos de grande extensão entre torres, quando o afastamento do plano do solo em relação aos condutores deixa esses últimos menos protegidos em relação às descargas atmosféricas laterais.

TABELA 2 - Sobretensões causadas por descargas diretas no cabo condutor (falha de blindagem)

I (kA)	Sobretensão (kV)	Tensão suportável das cadeias de isoladores -kV - (2 μs)			
		69	138	345	500
5	1000	599	1074	2157	2878
10	2000				
15	3000				

A Tabela 2 mostra, a título de ilustração, que todas as descargas atmosféricas que provocarem uma falha de blindagem em uma LT de 69 kV causarão desligamentos, uma vez que a probabilidade de ocorrência de descargas descendentes negativas menores que 5 kA é praticamente nula.

### 5.3 Sobretensão por “Backflashover”

Nesses casos, os raios atingem a torre ou o sistema de blindagem - cabos pára-raios ou mastros localizados no topo das linhas - e ao fluírem pelas estruturas para a terra elevam os seus potenciais. Dependendo dos valores da resistência de aterramento e da magnitude dos raios, a diferença de potencial que se estabelece entre a estrutura e os condutores pode ultrapassar a suportabilidade das cadeias de isoladores, rompendo a isolação e provocando um curto-circuito na linha, com seu conseqüente desligamento (5). As sobretensões por “backflashover” são a principal causa dos desligamentos das LTs do sistema CEMIG.

A Tabela 3 mostra a influência das intensidades de corrente das descargas, bem como das resistências de aterramento dos pés dos suportes, nas sobretensões causadas por “backflashover” em LTs de 138 kV. Observa-se que, para resistências de 25 Ω e correntes acima de 50 kA (35% de probabilidade de ocorrência), haverá sempre a interrupção na cadeia de isoladores.

TABELA 3 - Sobretensões causadas por descargas no suporte ou cabo pára-raios (“backflashover” em LTs de 138 kV, metálica e 1 c.p.r.)

I (kA)	Sobretensão na cadeia de isoladores (kV)						Tensão suportável das cadeias (kV)
	5 Ω	15 Ω	25 Ω	40 Ω	75 Ω	100 Ω	
5	44	77	108	150	231	278	
10	89	154	216	300	462	555	
20	177	308	432	600	923	1110	1074
40	355	616	864	1200	1846	2220	
60	532	925	1297	1800	2769	3330	

## 6 - APLICAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS PARA ANÁLISE DE FALTAS

A necessidade de fornecer energia de melhor qualidade para seus clientes tem impulsionado a CEMIG a aumentar o conhecimento da relação entre descargas atmosféricas e o desempenho do seu sistema elétrico, além da utilização das novas ferramentas para análise das faltas.

Essas ferramentas utilizam a tecnologia do Sistema de Localização de Tempestades (SLT), alicerçado em sistema de informações georreferenciadas e referências de tempo baseadas em GPS, combinando informações provenientes de Sistemas de Localização e análise de faltas (FALLS) com o caminhamento real das LTs e o instante das ocorrências.

A análise da falta associada à descarga atmosférica que a causou permite a identificação de pontos vulneráveis na LT e também a localização de regiões com alta incidência de descargas atmosféricas, possibilitando a realização de projetos diferenciados por região assim como auxiliando nos trabalhos da manutenção na identificação de LTs com problemas específicos.

### 6.1 Atualização do SLT

A CEMIG, visando aumentar os índices de detecção e reduzir os erros de localização das descargas atmosféricas (para menos de 500 m), empreendeu projeto de atualização do seu Sistema de Localização de Tempestade, em 1997. A Figura 3 mostra a localização atual dos sensores desse sistema.

### 6.2 Mapeamento e Precisão do Instante da Falta

Uma ferramenta de análise e localização, baseada no tempo e no espaço, não necessita somente de precisão na localização mas também de elevada acuidade na referência de tempo dos distúrbios ocorridos, para que se possa confirmar se a falta foi causada por descarga atmosférica ou outro tipo de interferência.

Para tanto, a CEMIG digitalizou e converteu para plataforma de geoprocessamento o caminhamento real das LTs de tensão 34,5 kV até 500 kV, utilizando GPS ou mapas de traçado de LTs (Ver Figura 4) . Para as LTs onde já foram instalados pára-raios de ZnO, foram identificados inclusive os suportes que contêm os pára-raios.

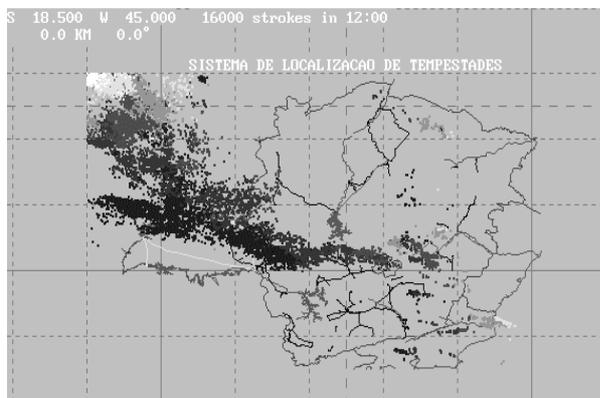


FIGURA 4 - Traçado das LTs da CEMIG

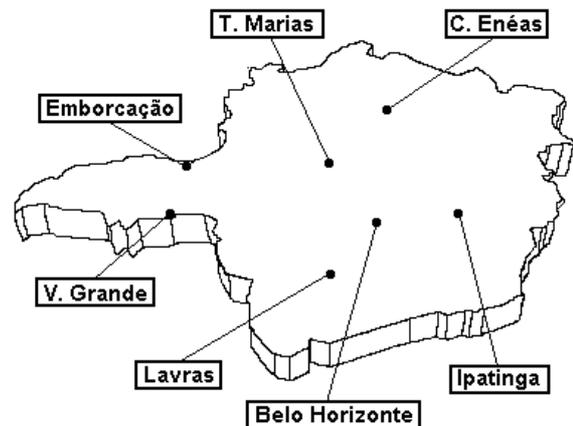


FIGURA 3 - Localização dos Sensores do Sistema de Localização de Tempestades

A CEMIG está instalando também uma rede de oscilografia em 43 Subestações, onde se pretende obter precisão da hora da ocorrência em milissegundos através de GPS e a localização do ponto da falta na LT em relação à subestação. Com o cruzamento dessas informações com as obtidas do SLT, será possível a identificação do raio causador da falta e realizar as análises de causa e efeito.

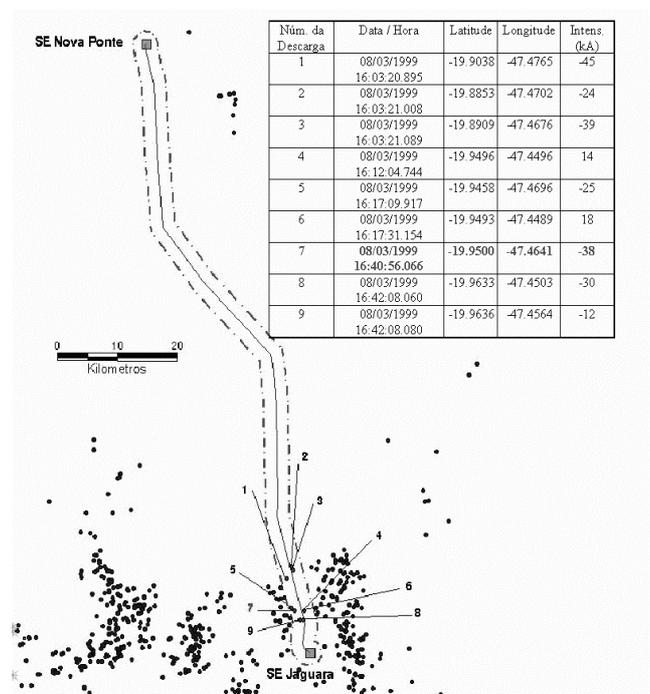


FIGURA 5 - Análise de Ocorrência de Falta

A Figura 5 apresenta a análise de uma falta ocorrida na LT Jaguara - Nova Ponte, onde observa-se que em intervalo de segundos ocorreram várias descargas, mostrando a necessidade da sincronização precisa dos sistemas de localização de descargas e de determinação da falta, para a identificação da descarga que realmente atingiu um ponto específico da LT e de suas características.

### 6.3 Determinação de Regiões com Alta Incidência de Descargas

A Figura 6, obtida do Sistema de Localização e Análise de Falhas (FALLS), apresenta o caminhamento da LT Gov. Valadares - Ipatinga, sobreposto ao mapa com a distribuição das densidades de descargas para a terra no período de um ano. Essas informações são extremamente úteis nas análises de estimativa de desempenho ou identificação de seções da linha que necessitam de proteções adicionais, por exemplo pára-raios de ZnO, dupla blindagem e/ou cuidados especiais com o aterramento dos suportes.

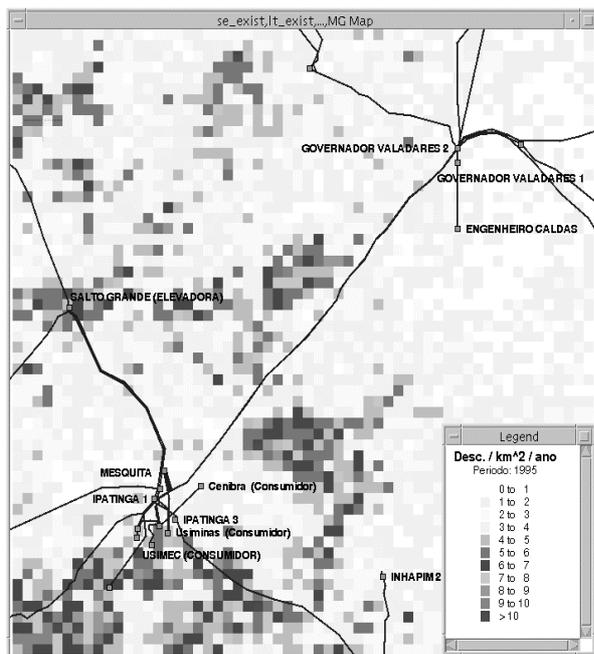


FIGURA 6 - Densidade de Descargas Atmosféricas na região da LT Gov. Valadares - Ipatinga

Quando uma linha específica é selecionada para estudos, pode-se visualizar o número de descargas atmosféricas em uma faixa ao longo da mesma, identificando áreas de maior concentração de descargas e avaliando inclusive a existência de descargas com alguma característica particular ou pontos fracos da LT.

A Figura 7 apresenta a LT Pandeiros - São Francisco 1 onde foram analisadas as descargas ocorridas em um raio de 3 km em relação ao eixo da linha no período de um ano (1990). Na hipótese de se introduzirem melhorias em seu desempenho frente a descargas atmosféricas, será mais efetivo concentrar esforços na área mais exposta (entre as latitudes -15,68 e -15,78) do que em toda a linha. A locação de pára-raios nessas partes mais solicitadas, ao invés de sua instalação em toda a linha, contribui para uma melhor relação custo/benefício na implantação dessas proteções.

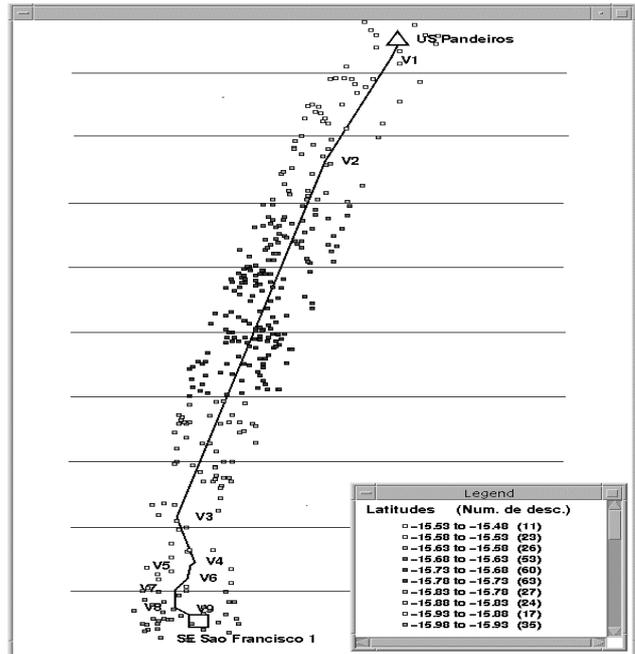


FIGURA 7 - Descargas Próximas à LT Pandeiros - São Francisco1

### 6.4 Avaliação do Desempenho de uma Linha

Um outro exemplo de aplicação do SLT e do Sistema FALLS é a análise de incidência com objetivo de acompanhar e avaliar o desempenho de LTs existentes e/ou avaliar se as melhorias realizadas estão sendo eficientes. Como dito anteriormente, a incidência de descargas atmosféricas varia bastante de um ano para outro, sendo importante a utilização dessas ferramentas na avaliação do desempenho de LTs em um curto intervalo de tempo. Sem essa ferramenta, esse tipo de análise demandaria um longo tempo para se obterem resultados significativos, com alto grau de incerteza.

### 6.5 Análise da Suportabilidade de uma Linha

Pela combinação dos dados do Sistema de Localização de Tempestades e a hora de ocorrência de um evento, é possível identificar a descarga atmosférica que causou a falta. Analisando a intensidade dessa descarga,

determinando a sobretensão gerada e com base na suportabilidade do isolamento da LT, é possível verificar se a mesma é suficiente para causar, por exemplo, um “backflashover”. Dessa forma é possível identificar pontos fracos da LT, racionalizando os esforços de manutenção e reduzindo custos.

## 7 - CONCLUSÕES

O conhecimento da incidência e dos parâmetros associados à forma de onda das descargas atmosféricas, é de essencial importância para o desenvolvimento de métodos e critérios para otimização do desempenho de instalações e equipamentos frente a descargas atmosféricas.

Os resultados preliminares obtidos com a Estação do Cachimbo e com elos magnéticos em LTs têm corroborado a tese de alguns pesquisadores de que as intensidade das descargas atmosféricas são mais elevadas nas regiões tropicais. Observa-se que as descargas atmosféricas descendentes negativas registradas na Estação do Cachimbo apresentam em média, intensidade de corrente 27% superiores às descargas incidentes em regiões temperadas do hemisfério norte.

O conhecimento da incidência de descargas atmosféricas em uma LT é fundamental para a avaliação e o acompanhamento do seu desempenho frente a descargas atmosféricas. Algumas vezes pode-se supor que melhorias realizadas em uma LT foram eficientes, com base na redução do número de faltas. Análises mais detalhadas, porém, podem indicar somente a redução da incidência de descargas atmosféricas no período analisado.

Ressalta-se a importância do conhecimento das condições reais do aterramento das linhas quando da análise de seu desempenho. Verifica-se que a resistência de aterramento dos suportes constitui fator determinante da ocorrência de “backflashover”.

A CEMIG vem realizando um programa para melhoria do desempenho de LTs com índices de faltas considerados pouco satisfatórios, com base em procedimentos convencionais (melhoria do aterramento e/ou isolamento) ou mesmo com a instalação de pára-raios de ZnO.

Para avaliação da eficácia das melhorias realizadas nas LTs e acompanhamento sistemático do seu desempenho, são fundamentais os atuais sistemas computacionais georreferenciados de identificação de faltas e análise de desempenho, apresentados no presente informe técnico.

Considerando as características do Estado de Minas Gerais relativamente à adversidade operacional, ou seja, alta incidência de descargas atmosféricas em algumas regiões, LTs localizadas em regiões montanhosas, alta intensidade de corrente das descargas atmosféricas e elevados valores de resistividade dos solos, seriam esperados níveis de desempenho pouco satisfatórios. Entretanto, observadas nossas condições particulares, as melhorias paulatinamente introduzidas têm levado a desempenhos satisfatórios, sendo que as linhas de EAT apresentam um comportamento operativo semelhante a outros sistemas de mesmas características operando em outros países.

Relativamente aos Sistemas de Localização de Tempestades (SLT) e de Localização e Análise de Faltas (FALLS), pode-se afirmar que os mesmos têm se apresentado bastante promissores como ferramentas de auxílio à operação de sistemas elétricos de potência e como geradores de informações para análises de causa e efeito e da atividade elétrica da atmosfera.

Como era de se esperar, ao se introduzir uma nova ferramenta ainda em desenvolvimento, atenção especial vem sendo dada à solução de alguns problemas operacionais que ainda persistem e às análises de sensibilidade para otimização dos índices de detecção, minimização dos erros de localização e avaliação da precisão das informações relativas às intensidades das correntes e multiplicidade.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DINIZ, J.H.; CARVALHO, A.M.; CHERCHIGLIA, L.C.L.; FILHO, J.J.S.; AMORIM, G.E.S. - Lightning Research Carried out by Companhia Energética de Minas Gerais - International Conference on Lightning Protection (ICLP), Italy, 1996
- (2) CARVALHO, A.M.; TRIGINELLI, W.A.C.; DINIZ, J.H.; CHERCHIGLIA, L.C.L. - Pesquisas de Descargas Atmosféricas em Minas Gerais - Principais Parâmetros Aplicáveis à Engenharia - XIII SNPTEE - 1995
- (3) BEZERRA, A.C.G., CHERCHIGLIA, L.C.L. - Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas - Seminário Avançado de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica - BH, 1996
- (4) KAPPENMAN, J.G.; HOUSE, D.L.V. - Location-Centered Mitigation of Lightning-Caused Disturbances - Minnesota Power, 1996