

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC

ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO DEVIDO À DESCARGA ATMOSFÉRICA NO SISTEMA DE EXTRA-ALTA TENSÃO DA CEMIG

* Angélica da Costa Oliveira Rocha
Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG

Jeder Francisco de Oliveira
Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG

Resumo

Curto-circuitos trifásicos devido à descargas atmosféricas em linhas de transmissão em extra - alta tensão são eventos raros de ocorrer nos sistemas de potência. Este trabalho descreve a ocorrência de um curto-circuito desta natureza em uma linha de 500kV do sistema de transmissão da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), apresentando as análises realizadas com o objetivo de confirmar sua causa, avaliar o seu impacto no sistema e determinar medidas necessárias para minimizar sua probabilidade de ocorrência.

Palavras-chaves:

Descarga atmosférica; Curto-circuito trifásico 500kV; Análise de proteção e transitório eletromagnético; Monitoramento em tempo real; Qualidade de energia.

1. INTRODUÇÃO

A Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG - possui uma capacidade instalada de 5514MW e seu sistema de transmissão, compreende 30 subestações e 4817km de linhas de transmissão de tensões entre 230 e 500kV. Esse sistema elétrico está inserido em regiões de altas resistividades do solo e elevados níveis cerâmicos que podem contribuir de forma negativa para o desempenho das instalações frente à descargas atmosféricas. Essas condições ambientais adversas do Estado de Minas Gerais tem levado a Cemig a investir recursos em novas tecnologias e pesquisas com o objetivo de minimizar o impacto dessas condições na qualidade do suprimento de energia a seus consumidores.

No caso específico das linhas de transmissão, as estatísticas internacionais apontam como causa principal para os desligamentos não programados às descargas atmosféricas. Esses desligamentos provocam, na maioria das vezes, curtos monofásicos e

se concentram em linhas de tensões inferiores a 230kV. Sendo assim, a ocorrência de um curto-circuito trifásico na LT 500kV Jaguará - Nova Ponte do seu sistema de transmissão, tendo como causa uma descarga atmosférica, levou a CEMIG a dar início a uma análise detalhada do distúrbio, tendo em vista o seu importante reflexo na operação do sistema tais como o desligamento de grandes consumidores da transmissão.

A LT 500kV Jaguará-Nova Ponte, local de ocorrência do curto-circuito, integra o sistema de transmissão brasileiro responsável pelo escoamento da potência gerada pelas usinas que compõem um dos principais parques geradores da região Sudeste do país. A linha em questão interliga a Us. Jaguará (448 MVA) e a Us. Nova Ponte (537MVA), participando, também, de forma decisiva da trocas energéticas entre regiões geradoras do sistema elétrico brasileiro. A figura 1 apresenta o sistema principal de geração e transmissão da CEMIG no Estado de Minas Gerais, do qual a LT faz parte.

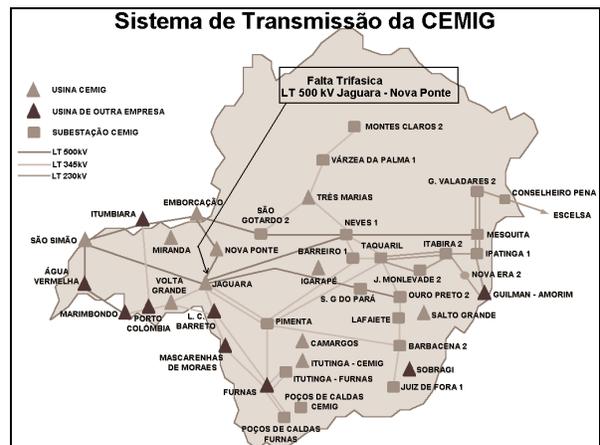


FIGURA 1: Sistema de geração e transmissão da CEMIG

Sob o ponto de vista das densidades das descargas, a LT 500kV Jaguará- Nova Ponte atravessa uma das

regiões de maior densidade de descarga do Estado de Minas Gerais, chegando a 8 descargas/km²/ano, próxima à SE Jaguara.

O objetivo desse trabalho é apresentar as avaliações realizadas do distúrbio envolvendo a LT 500 kV Jaguara-Nova Ponte, incluindo a análise da operação das proteções, a análise das condições meteorológicas no instante da falta e seus efeitos, simulações transitórias e medições de campo.

2. ANÁLISE DA OCORRÊNCIA

2.1 Análise da Proteção

Para monitorar seu sistema de transmissão provendo recursos para a análise de perturbações e localização de faltas, a CEMIG desenvolveu uma Rede de Oscilografia (SAPNET), incluindo um conjunto de hardwares e softwares integrados que permite o acesso aos dados gerados por Registradores Digitais de Perturbações (RDP), Relés Digitais e Sistemas de Supervisão e Controle Local (SSCL). Uma característica importante deste sistema é a localização de falta nas linhas de transmissão, o que é feito através de um algoritmo desenvolvido especificamente para essa função. A SAPNET permite determinar o tipo de falta, sua duração, localização e seu efeito em outros barramentos do sistema de transmissão. Atualmente, este sistema tem cerca de 50 Registradores de Digitais de Perturbações instalados nas principais subestações de transmissão da CEMIG e também nos sistemas de subtransmissão [1].

Faltas trifásicas em linhas de transmissão de 500 kV são eventos muito raros e os poucos casos que aconteceram no sistema de transmissão da CEMIG nunca haviam sido registrados, e não foram, portanto, confirmados e analisados completamente.

O curto-circuito trifásico na LT 500kV Jaguara-Nova Ponte aconteceu no dia 8 de março de 1999, às 16:40 hs. A figura 2 mostra a forma de onda da falta trifásica, obtida pelo RDP instalado na subestação da Usina de Nova Ponte. O curto circuito durou aproximadamente 45 ms e a tensão chegou a 40% de seu valor nominal nessa subestação. Por meio de simulações com o programa de curto-circuito Aspen Oneliner [2], tais valores foram confirmados e extrapolados aos outros barramentos do sistema. A Fig. 3 apresenta os resultados do sistema de localização de falta. A falta foi localizada nos primeiros três quilômetros de subestação de Jaguara. Foi a primeira vez em que uma ocorrência deste tipo foi registrada em detalhes.

2.2 Análise das descargas atmosféricas

A confirmação da causa do curto-circuito trifásico na linha, como sendo descarga atmosférica, foi possível utilizando-se a tecnologia do Sistema de Localização de Tempestades da CEMIG. Esse sistema combina informações provenientes do Sistema de Localização e Análise de Faltas (FALLS) com o caminhamento real das linhas digitalizado e convertido para uma

plataforma de geoprocessamento utilizando GPS ou os próprios mapas de traçado das LTs. O cruzamento dessas informações com as obtidas pelo sistema SAPNET possibilitou a identificação das provável descarga causadora da falta, contribuindo para a análise de causa e efeito da ocorrência.

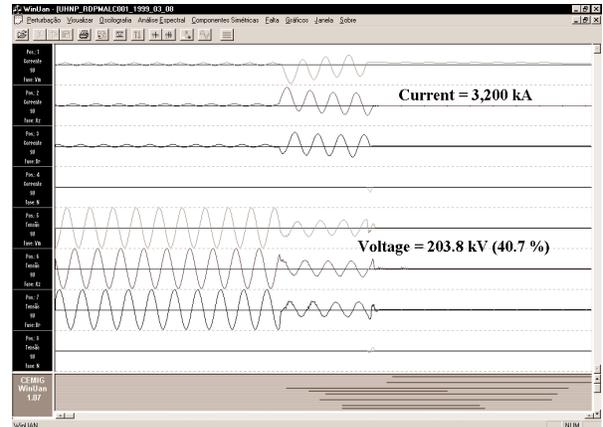


FIGURA 2: Falta trifásica registrada pelo RDP

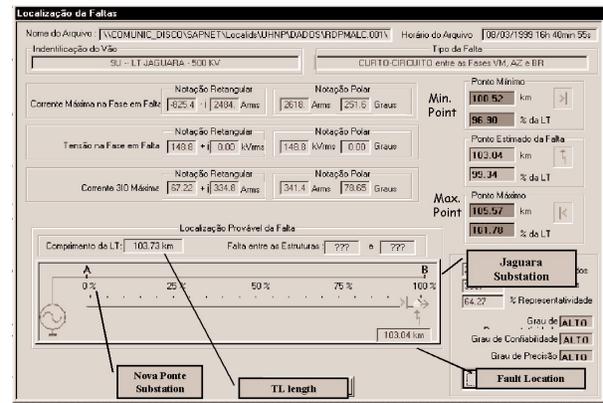


FIGURA 3: Resultado do Sistema de Localização de Falta

O Sistema de Localização de Tempestades da CEMIG, em operação desde 1988, foi atualizado em 1997, visando aumentar os índices de detecção e reduzir os erros de localização das descargas para menos de 500m. A utilização desse recurso na análise de ocorrência envolvendo a LT 500kV Jaguara - Nova Ponte está apresentada na figura 4.

Observa-se um número elevado de descargas, resumidas na tabela, atingindo a LT no local aonde a falta foi localizada e no período de sua ocorrência (intervalos de segundo). Como o curto foi registrado às 16:40:55 horas pelo pela rede de oscilografia, a descarga de número 7 (38kA) é a mais provável, dentre as registradas, de ter sido a causadora da falta.

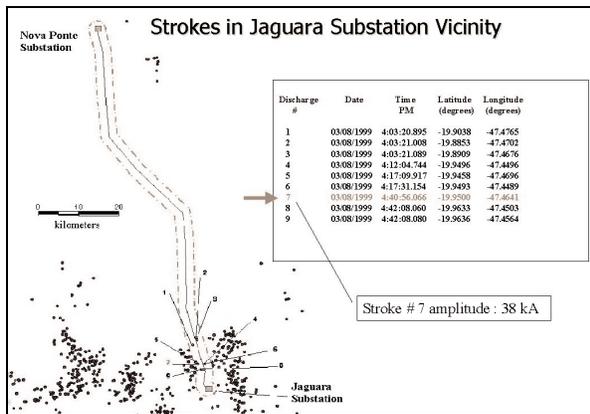


FIGURA 4: Registro do SLT no momento do curto-circuito trifásico

2.3 Análise da qualidade de energia

Hoje em dia, os consumidores industriais estão investindo cada vez mais na modernização das suas plantas industriais, através de equipamentos comandados por Controladores Lógicos Programáveis (CLP) e dispositivos de velocidade variável. Tais equipamentos são extremamente sensíveis a variações de tensão de curta duração (VTCD), especialmente aquelas que envolvem mais de uma fase. As VTCD são, atualmente, a causa principal de perda de produção em consumidores industriais.

Durante a ocorrência de 8 de março de 1999, houve uma perda de carga de 270 MW no sistema CEMIG. Tal perda está justificada pelos valores de tensão da ordem de 70% o valor nominal, devido ao curto-circuito, nos barramentos entrada dos principais consumidores industriais.

2.4 Análise Transitória

As simulações transitórias foram realizadas com o programa Alternative Transient Program (ATP) e tiveram como objetivo principal reproduzir as condições que levaram a ocorrência do curto-circuito trifásico, tomando-se como base informações dos sistemas SAPNET e SLT.

As modelagens utilizadas para os principais componentes do sistema em análise foram:

- Modelagem das linhas de transmissão

Simulou-se 17 vãos da LT 500kV Jaguará- Nova Ponte a partir da SE Jaguará, tomado-se como referência as informações do software de localização da falta. Os parâmetros foram calculados utilizando-se a rotina JMARTI que faz uma variação desse parâmetros com a frequência. Após a última estrutura, introduziu-se a matriz de impedância de surto da linha, sendo o mesmo procedimento adotado para as outras linhas de 500kV conectadas à SE Jaguará.

- Torres de transmissão

As torres foram modeladas por uma única impedância característica igual a 150 ohms e tempo de trânsito calculado em função da altura da torre. A impedância de aterramento foi modelada como uma resistência concentrada, variando-se o seu valor a partir de 30ohms, valor médio considerado no projeto da linha.

- Fontes

Modelou-se uma fonte de tensão senoidal conectada à SE Jaguará representando as tensões de operação do sistema. As descargas atmosféricas foram representadas por fontes de corrente ideais, tipo slope ramp 2,6/62 μ .

A amplitude da corrente de descarga foi variada de 38kA (valor registrado pelo SLT) até 80kA, para considerar alguma imprecisão na estimativa de corrente do SLT.

- Cadeia de isoladores

As cadeias de isoladores foram modeladas como uma chave controlada tendo como referência à tensão crítica de ruptura da cadeia para descargas atmosféricas U50 (tensão com probabilidade de 50% de haver ruptura) considerada igual a 1904kV para impulso negativo.

Inicialmente, as simulações foram realizadas fazendo-se uma variação das correntes de descargas e resistências de pé de torre porém sem considerar a presença da fonte de 60Hz do sistema. Considerou-se a queda da descarga em um dos cabos pára-raios próximo à fase C de uma torre situada a aproximadamente 2 Km da SE Jaguará, dentro da região de possibilidade de ocorrência da falta. A figura 5 apresenta um desenho da torre com a posição relativa entre as fases e o local considerado para a queda do raio.

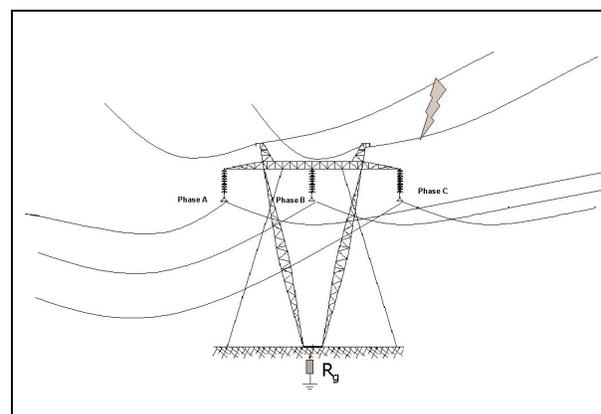


FIGURA 5: Desenho da Torre – Local queda da descarga

Para essa condição, sem a influência das tensões de 60Hz, não ocorreram ruptura nas cadeias das três fases, condição para o curto trifásico, mesmo ao se considerar valores inferiores a 1904kV, considerando-se o desvio padrão de 3%, utilizado para impulsos atmosféricos. Na maioria dos casos simulados, só

ocorreram disparos nas fases A e C. Isto se explica pelo fato da fase B possuir um maior acoplamento com os cabos pára-raios que tende a diminuir a tensão entre os terminais da cadeia de isoladores.

A figura 6 apresenta as tensões nas cadeias das três fases para uma corrente de descarga de 38 kA, valor registrado pelo SLT próximo ao horário da ocorrência, e um resistência de pé de torre de 400 ohms. Observa-se disparos apenas da fase A e C, mesmo para o valor considerado de resistência de aterramento, significativamente superior ao médio da linha.

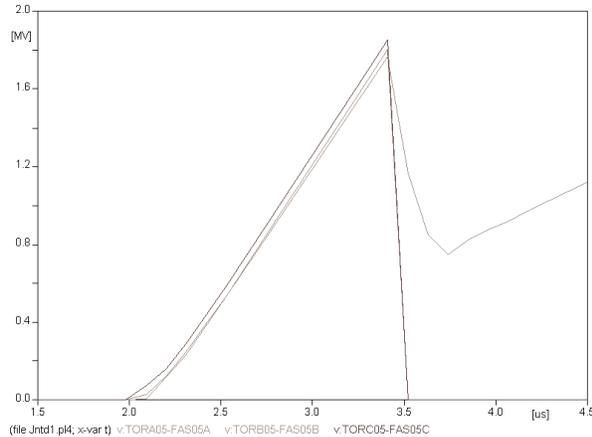


FIGURA 6: Disparo dos isoladores fase A e C $I = 38$ kA and $R_g = 400 \Omega$

A figura 7 apresenta, também, o comportamento das tensões das cadeias porém para uma corrente de descarga de 80kA, quase o dobro da registrada pelo SLT, e resistência de 30 ohms, valor médio da LT. Nesse caso, só ocorreu disparo para cadeia da fase C, mais próxima à queda do raio, que provocou um decréscimo instantânea da tensão da torre, evitando o disparo das cadeias das outras fases.

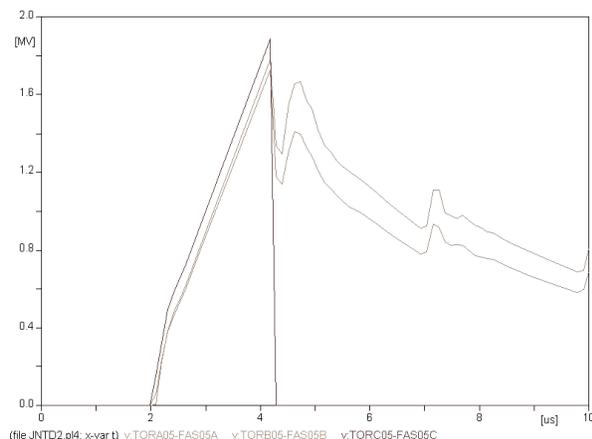


FIGURA 7: Disparo do isolador fase C $I = 80$ kA and $R_g = 30 \Omega$

Esses resultados indicaram a importância de se considerar a influências das tensões de 60Hz na análise do comportamento das cadeias de isoladores frente às descargas atmosféricas para sistemas de Extra Alta Tensão.

No caso específico do sistema de 500kV, as tensões fase-terra representam um valor significativo da tensão suportável considerada para a cadeias, em torno de 20%, que podem ser determinantes para que a tensão de ruptura seja atingida, dependendo de suas amplitudes e polaridades no momento da descarga.

Partiu-se, então, para a avaliação das condições para o disparo das três cadeias considerando-se as tensões em 60Hz de operação do sistema, adotando-se a seguinte metodologia na simulações :

- Local da queda da descarga foi considerado igual ao adotado nas análises realizadas sem a fonte de 60Hz
- Como as tensões de 60Hz irão se somar ou subtrair, função da polaridade, à tensão da torre, para a obtenção das tensões das cadeias de isoladores, as amplitudes e polaridades dessa tensão foram variadas com o objetivo de se determinar uma faixa mais favorável à ocorrência de disparos das cadeias das três fases. Essa análise foi realizada considerando-se, como referência, a corrente de 38kA, registrada pelo SLT, e resistência de pé de torre de 400ohms.
- As resistências de pé de torre foram calculadas pelo ATP variando-se a amplitude da corrente de descarga entre 38 e 80kA e considerando-se as tensões de 60Hz dentro da faixa favorável à ocorrência de disparos das cadeias das três fases. Essas resistências foram depois confirmadas através de medições de campo que serão discutidas no próximo item do presente trabalho.

Dentro os casos simulados, os disparos das três cadeias ocorreram para fase C com tensão de 60Hz positiva com amplitude próxima do pico, minimizando o valor da tensão da cadeia dessa fase, e provocando um atraso no seu disparo. Para que esse disparo acontecesse, considerou-se um valor de tensão de disparo para a cadeia dessa fase um pouco inferior as das demais, introduzindo uma certa compensação para o efeito da polaridade positiva da tensão 60Hz.

Com relação as fases A e B, os disparos se deram com as tensões de 60Hz com polaridades negativas, condição que tende a aumentar as tensões das cadeias dessas fases. A tensão de 60Hz da fase B também deveria estar mais negativa que a da fase A, compensando um maior acoplamento da fase B com os cabos pára-raios que atua no sentido de diminuir a tensão da cadeia dessa fase, conforme já comentado.

A figura 8 apresenta a região das tensões de 60Hz para a qual se conseguiu o disparo das três cadeias, ocasionando o curto trifásico, para as condições estudadas. A figura 9 apresenta o resultado de uma das condições estudadas, corrente de descarga de 40kA e resistência de 400 ohms, mostrando o disparo das três cadeias.

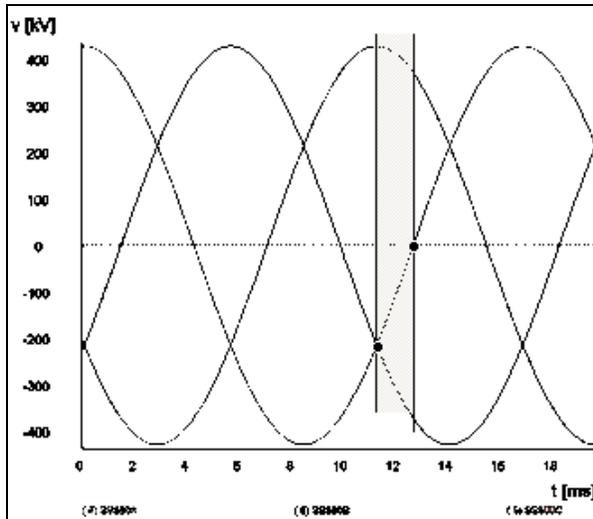


FIGURA 8: Faixa da tensão de operação 60 Hz
Disparo isoladores das três fases

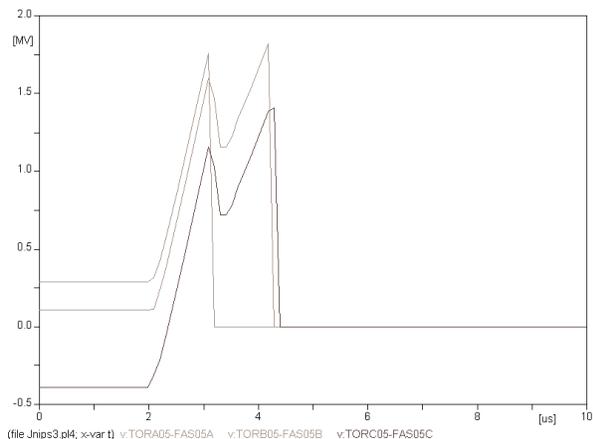


FIGURA 9: Disparo dos isoladores das três fases
 $I=40\text{kA}$ and $R_g = 400 \Omega$

A tabela 1 apresenta para alguns valores de corrente de descarga, a resistência de aterramento mínima necessária para que ocorra o disparo das três cadeias, com as tensões de 60Hz dentro da faixa indicada na figura 6.

TABELA 1: Corrente de Descarga X Resistência de pé de torre.

Disparo isoladores das três fases	
IS (kA)	Rg (Ω)
40	400
60	200
80	90

NOTA: IS = Amplitude corrente de descarga
Rg = Resistência de pé de torre

As simulações transitórias mostraram, então, a necessidade de se ter a ocorrência de determinadas condições, bem caracterizadas e específicas, para que se tenha a ocorrência do curtos-circuitos trifásicos, devido a descargas atmosféricas, em LTs de extra-alta tensão, tais como: altas correntes de descarga, elevadas resistência de aterramento das torres,

instante da tensão de operação em 60Hz, tensão de interrupção das cadeias. A necessidade da ocorrência conjunta de todos esses fatores explica a raridade desse tipo de evento na operação do sistema de transmissão.

2.5 Medições de campo

Com o objetivo de confirmar os resultados das simulações que indicaram a necessidade de se ter altas resistências de aterramento na LT 500 kV Jaguará -Nova Ponte para que o curto-trifásico se verificasse, foram realizadas medições de resistência de pé de torre em 6 estruturas da linha localizadas no trecho indicado pelo software de localização de falta (primeiros quilômetros a partir da SE Jaguará).

O solo da região da Us. Jaguará é seco e muito pedregoso, apresentando alta resistividade. Um resumo dos resultados encontrados está apresentado na tabela 2 e confirmam essas características. Observa-se que as medições na estrutura 691, por sua localização desfavorável e a pior amostra do solo, apresentou o valor mais elevado de resistência de aterramento, 383ohms.

TABELA 2: Resistência de pé de torre
Resultados medição de campo

Torre (#)	Distância de Jaguará (%)	Resistência (Ω)
691	5	383
701	1.5	111.3
698	2.5	27.8

Esse valor está próximo do encontrado para a resistência de aterramento na simulação para uma corrente de descarga de 40 kA (figura 5, tabela 1). Esta coerência entre o resultado das simulações, o registro do SLT, a região de localização da falta e o valor encontrado nas medições de resistência permite comprovar a ocorrência do curto-circuito trifásico na LT.

A Cemig está implementando um plano de ação com o objetivo de reavaliar as resistências de aterramento das estruturas de suas linhas em tensões superiores a 230kV, implementando as medidas necessárias para evitar ao máximo ocorrências dessa natureza. Estão sendo realizados, por exemplo, estudos de viabilidade para instalação de pára-raios de LT no sistema de 230kV aonde estão concentrados o maior número de consumidores industriais do sistema de transmissão, partindo-se da experiência já adquirida da empresa com essa tecnologia em outros níveis de tensão.

3. CONCLUSÃO

O trabalho apresentou a análise realizada pela CEMIG da ocorrência de um curto-circuito trifásico na LT 500kV Nova Ponte–Jaguará integrante do seu sistema de transmissão. Este evento, considerado raro, teve importante reflexo na operação do sistema, o que motivou uma investigação mais aprofundada de sua ocorrência. Avaliações conjuntas do comportamento das proteções e das condições meteorológicas, utilizando-se informações da rede de oscilografia com

software de localização de faltas e do Sistema de Localização de Tempestade da CEMIG, foram essenciais para a caracterização da falta. Este fato reforça a importância cada vez maior de se investir em novas tecnologias para um maior conhecimento dos distúrbios no sistema elétrico com consequente melhoria da qualidade do suprimento de energia aos consumidores.

Uma outra conclusão importante do trabalho diz respeito a utilização do ATP como ferramenta eficaz e complementar nas análises de ocorrência no sistema elétrico. Neste caso específico, as simulações transitórias não só confirmaram a possibilidade de ter sido a descarga atmosférica a causa da ocorrência como mostraram o porquê de sua baixa probabilidade, contribuindo para um maior conhecimento desse tipo de evento em sistemas de extra-alta tensão.

4. REFERÊNCIAS

[1]. Gomes, Nilo Sérgio, et alli,. "CEMIG's Oscillography Network". *V Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE (SP-069)*. Recife/PE - BRAZIL, may 19-24, 1996.

[2]. Chan, Sherman, et alli, – *ASPEN Onliner Reference Manual* - San Mateo – CA - 1999

[3] Carvalho, M. A, et alli,. *Tecnologias para Análise e Melhoria do Desempenho de Instalações de Transmissão frente a descargas atmosféricas. XV SNTPEE*, Foz do Iguaçu- Brazil – 1999.

[4] Diniz, J.H et alli,. *Lightning Research Carried out by Companhia Energética de Minas Gerais- International Conference on Lightning Protection (ICPL)*, Italy, 1996