



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

FI/GDS/15
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRETAS: UMA PROPOSTA DE MODELAGEM COMPUTACIONAL MAIS REALÍSTICA PARA O PROJETO DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

**André Roger
Rodrigues(*)**
IFMG – CAMPUS FORMIGA

**Marcelo Lynce R.
Chaves**
UFU

**Geraldo Caixeta
Guimarães**
UFU

**Wallace do Couto
Boaventura**
IFMG

RESUMO

A incidência de descargas atmosféricas nas linhas de transmissão determinam o surgimento de solicitações de tensão de elevadas amplitudes impostas às cadeias de isoladores, constituindo a principal causa de desligamentos. A amplitude das sobretensões é dependente, principalmente, das características da corrente de retorno da descarga atmosférica, do perfil das torres da linha de transmissão e do sistema de aterramento. Quando a amplitude das sobretensões de origem atmosférica supera a suportabilidade dielétrica de, uma ou mais, cadeias de isoladores da linha de transmissão é estabelecido um arco elétrico ao longo do contorno do isolamento, configurando-se um evento de curto-circuito entre o(s) cabo(s) fase e terra.

Portanto a avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas requer o desenvolvimento de modelos capazes de representar adequadamente os mecanismos determinantes dos desligamentos desta natureza.

Inicialmente, este informe técnico apresenta um modelo computacional desenvolvido através da utilização do *software ATP* e de sua interface gráfica *ATPDraw*, para a avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente às sobretensões originadas por descargas atmosféricas. O objetivo do trabalho é desenvolver uma ferramenta capaz de representar, de forma mais apropriada e com precisão aceitável, os fenômenos eletromagnéticos determinantes para um projeto eficiente de coordenação de isolamento de linhas de transmissão. Para tanto, deve ser considerada a influência das características individuais das ondas de sobretensão originadas por descargas atmosféricas, na suportabilidade das cadeias de isoladores.

Nesse sentido, é apresentado um novo módulo desenvolvido com a utilização da rotina DBM (Data Base Module) do ATP (*Alternative Transients Program*), para a representação de correntes de retorno de descargas atmosféricas, com formas de ondas típicas, extraídas de dados de medições realizadas na estação do Morro do Cachimbo/MG. Os resultados obtidos com a criação deste novo módulo, que atua como fonte de corrente baseada na função matemática de Heidler, proporcionaram uma representação mais realística das características das formas de onda das correntes de retorno reais. A fonte de corrente de Heidler modelada, foi comparada com dados de registros de corrente de primeiras descargas atmosféricas para fins de validação.

Essa estratégia de modelagem é de grande relevância para a condução de estudos de coordenação de isolamento, aplicados às linhas de transmissão, permitindo uma análise mais confiável do seu desempenho elétrico frente às sobretensões de origem atmosférica.

Em seguida, utilizou-se o módulo de fonte de corrente de Heidler para a condução de estudos de coordenação de isolamento, que contemplaram a avaliação da suportabilidade de cadeias de isoladores em um trecho de sistema de transmissão de 500 [kV], formado por quatro vãos de linhas, quando da incidência de descarga indireta na torre da linha de transmissão. Os estudos tem o propósito de avaliar o desempenho elétrico do isolamento da torre atingida pela descarga, considerando as ondas viajantes ao longo dos vãos de linhas adjacentes. Com este

(*) Avenida João Naves de Ávila, n° 2121 – sala 10 - Bloco 1N – CEP 38.408-100, Uberlândia, MG, – Brasil
Tel: (+55 34) 3239-4758 – Cel: (+55 34) 9639-2625 – Email: andre.roger@ifmg.edu.br

objetivo, foi então realizada a modelagem da dinâmica da disrupção utilizando componentes da rotina TACS do ATP, para avaliar o desempenho de linhas de transmissão frente aos eventos de *backflashover*.

Este sistema de controle que representa a disrupção, possibilitou a determinação tanto das máximas sobretensões admissíveis, quanto da amplitude da corrente crítica de descarga atmosférica. O sistema também é capaz de identificar em qual cadeia de isoladores ocorre a disrupção, bem como o instante de tempo de ocorrência, para cada caso analisado.

A característica de suportabilidade dielétrica dos isoladores frente aos impulsos com formas de onda não padronizadas, tais como as formas de ondas de correntes reais que foram utilizadas neste trabalho, não é adequadamente representada pela utilização da Curva tensão-tempo padrão (Hagenguth, 1941). Portanto, os resultados de desempenho das linhas de transmissão obtidos com a utilização da curva V-t para forma de onda padronizada, foi comparada aos resultados obtidos com a aplicação do Método *LPM-Leader Progression Model* (IEEE Task Force Report 15.09, 1994). A avaliação dos resultados obtidos proporcionou uma análise mais precisa e criteriosa do desempenho elétrico de linhas de transmissão, com o emprego do método LPM para a determinação do valor da tensão de disrupção crítica (CFO), para sobretensões com forma de onda não padronizadas. O modelo computacional desenvolvido permite a avaliação da influência de alguns dos principais fatores determinantes da amplitude das sobretensões atmosféricas resultantes, configurando-se num sistema auxiliar especializado para o projeto de coordenação de isolamento de linhas de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Backflashover, Coordenação de Isolamento, Desempenho de Linha de Transmissão, TACS, MODELS, *Leader Progression Model*, Sobretensões com formas de onda não padronizadas.

1.0 - INTRODUÇÃO

No projeto de coordenação de isolamento de uma linha de transmissão é importante determinar o seu nível básico de isolamento a impulso atmosférico. A incidência de descargas atmosféricas nas linhas de transmissão, determinam o surgimento de solicitações de tensão de elevadas amplitudes, aplicadas às cadeias de isoladores. A amplitude das sobretensões é dependente das características da corrente de retorno da descarga atmosférica, do perfil das torres da linha de transmissão e também do sistema de aterramento.

Os parâmetros que determinam o nível de isolamento da linha de transmissão são obtidos experimentalmente, através da execução de ensaios laboratoriais aplicados aos isoladores, submetidos a tensões com forma de onda padronizada para impulso atmosférico. As tensões de ensaio a impulso atmosférico possuem formato bi-exponencial do tipo 1,2/50 [μs] que, em tese, visa reproduzir as características típicas (amplitude, tempo de frente e tempo de calda) das correntes de descarga que atingem as linhas de transmissão e geram as sobretensões ao percorrerem as torres, os cabos fase, ou ainda os cabos guarda. Contudo, o desenvolvimento de mecanismos e técnicas para medições de correntes de descarga, permitiram a obtenção de registros na estação do Morro do Cachimbo em MG [1]. Tais registros demonstraram que as sobretensões atmosféricas reais podem possuir formas de onda bem diferentes daquela utilizada na execução dos ensaios a impulso atmosférico padronizado.

Dessa forma, as correntes de descargas do tipo dupla exponencial, comumente utilizadas em ensaios laboratoriais a impulso atmosférico e em estudos computacionais para proteção de sistemas de transmissão, são capazes de reproduzir apenas parcialmente as características observadas em medições de correntes de retorno de descargas reais.

A função analítica de Heidler [2] permite a adequada representação de curvas médias de corrente, obtidas a partir de registros de medições diretas em torres instrumentadas, sendo possível obter formas de onda bem próximas das ondas de corrente de descargas reais [3].

Diante do exposto, este trabalho apresenta um novo módulo implementado no ATPDraw, capaz de atuar como uma fonte de corrente com forma de onda estabelecida pela função de Heidler. A forma de onda gerada computacionalmente com a utilização da fonte de corrente de Heidler, foi comparada com dados de registros de correntes de primeiras descargas atmosféricas para fins de validação [1,3]. Em seguida, o modelo de fonte de Heidler foi utilizado para a realização de estudos de coordenação de isolamento em um trecho de um sistema de transmissão de 500 kV, com o intuito de determinar o surto de tensão no condutor fase para a condição de descarga indireta, ou *backflashover*. O modelo computacional desenvolvido permite a avaliação da influência de alguns dos principais fatores que determinam a amplitude das sobretensões atmosféricas.

Um sistema de controle capaz de representar a disrupção sobre a cadeia de isoladores foi implementado com componentes da rotina TACS do ATP. Este sistema permite identificar a amplitude da máxima sobretensão admissível e a corrente crítica de descarga, além de registrar em qual cadeia de isoladores ocorreu a disrupção, e ainda, o instante de tempo de sua ocorrência.

2.0 - MODELAGEM COMPUTACIONAL

Neste item são apresentadas as metodologias e técnicas computacionais, empregadas para a representação dos componentes do sistema elétrico e dos fenômenos eletromagnéticos, associados ao estudo de desempenho elétrico das linhas de transmissão ante sobretensões originadas pela incidência de raios.

2.1 Modelagem da Corrente de Retorno da Descarga Atmosférica

Tradicionalmente, a onda de corrente de retorno é representada em estudos computacionais por uma função dupla exponencial, constituída pela soma de duas formas de onda exponenciais com constantes de tempo diferentes e de sinais contrários. Tal fato está associado a adoção desta forma de onda como padrão para a condução de ensaios de desempenho de equipamentos frente a impulsos atmosféricos reproduzidos em laboratório [4]. A facilidade de geração desta forma de onda padronizada para impulsos atmosféricos, através de arranjos de circuitos RC e de ajuste adequado de seus parâmetros às exigências dos ensaios experimentais, contribuíram para sua larga utilização. No entanto, diferenças significativas foram identificadas entre as características de descargas reais, registradas em medições e a forma de onda dupla exponencial. Tais características são importantes e devem ser levadas em consideração no projeto de coordenação de isolamento de linhas de transmissão. A função de Heidler é capaz de representar, com maior precisão, a natureza côncava da onda de corrente de descarga, no início da frente da onda, a ocorrência da derivada máxima próxima ao pico e a declividade após a ocorrência da pico.

A função de Heidler é dada pela Equação 1 abaixo:

$$F(t) = \frac{I_o}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^{(1/n)}}{1 + (t/\tau_1)^{(1/n)}} e^{(-t/\tau_2)} \quad (1)$$

onde:

- I_o - amplitude da corrente na base do canal;
- τ_1 - constante de tempo relacionada ao tempo de frente da onda de corrente.
- τ_2 - constante de tempo relacionada ao tempo de decaimento da onda de corrente.
- n - expoente de ajuste da função de Heidler.
- η - é um fator de correção de amplitude calculado pela Equação 2:

$$\eta = e^{(\tau_1/\tau_2)(n \cdot \tau_1/\tau_2)^{(1/n)}} \quad (2)$$

Dessa forma, a corrente de descarga foi representada pela soma de funções de Heidler para a reprodução das características observadas nas correntes de descargas reais.

Baseado nos trabalhos de Visacro [4] e De Conti [5], a corrente de retorno foi aqui representada pela soma de sete funções de Heidler. Os parâmetros das funções de Heidler propostos em De Conti [5], utilizados para representar as primeiras descargas de retorno medianas, obtidas das medições na estação do Morro do Cachimbo, foram extraídos de [1] e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para modelagem da fonte de corrente de Heidler.

Forma de Onda	I_o [kA]	τ_1 [μs]	τ_2 [μs]
1	6	2	76
2	5	3	10
3	5	5	30
4	8	9	26
5	16.5	30	23,2
6	17	2	200
7	12	14	26

O ATPDraw permite ao usuário criar novos componentes através da utilização de arquivos do tipo *DBM files (Data Base Modularization)*. Utilizando este recurso foi criado um componente que representa uma fonte de corrente constituída pela soma de até sete funções de Heidler, possibilitando a representação de correntes de descarga, com formas de onda similares àquelas obtidas em registros de medições na Estação do Morro do Cachimbo.

A utilização dos parâmetros de funções de Heidler mostrados na Tabela 1, compõem a forma de onda de correntes medianas de retorno mostradas na Figura 1.a. A fonte de Heidler implementada computacionalmente é mostrada na Figura 1.b, para fins de comparação e validação do módulo criado.

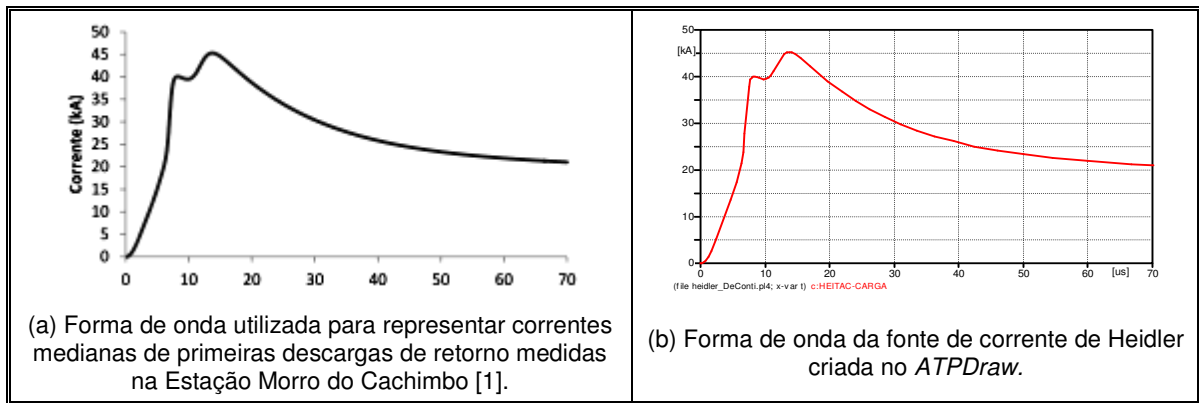


FIGURA 1 - Forma de onda da corrente de descarga representada por funções de Heidler.

2.2 Modelagem das Linhas de Transmissão

A configuração geométrica de uma linha de transmissão determina a suportabilidade do isolamento entre os cabos fase e os cabos para-raios, e influencia nas amplitudes de sobretensões resultantes da incidência de descargas atmosféricas. Devido à grande variedade de torres existentes, neste trabalho foi utilizada uma torre do tipo convencional de 500 kV, com circuito simples, extraída de [3]. As fases estão dispostas em feixes simétricos, compostos por quatro sub-condutores *GROSBEAK* 636 MCM, CAA, espaçados de 0,4 m. Os dois cabos de blindagem são do tipo EHS 3/8", classe C, posicionados consoante o perfil de torre mostrado na Figura 2.

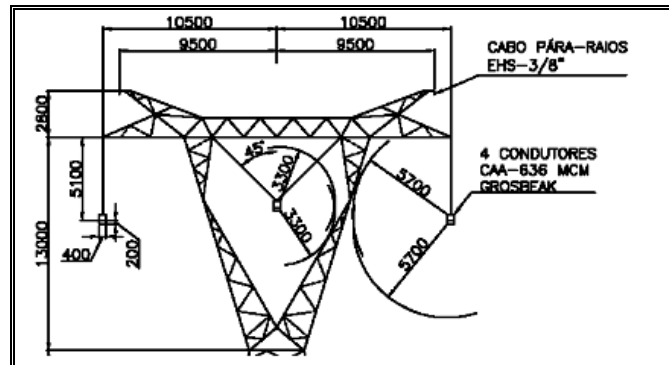


FIGURA 2 - Geometria da torre do tipo convencional de linha trifásica de 500 kV.

Os dados contendo as especificações elétricas e mecânicas dos cabos utilizados na torre convencional estão relacionados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados Elétricos e Mecânicos dos Cabos

Nome do Cabo	Grosbeak	EHC 3/8'
Tipo	CAA	EHS Classe C
Comprimento do Vão (m)	600	500
Flechas (m)	25,67	22
Seção do Cabo (mm ²)	374,30	195,00
Diâmetro Interno (cm)	0,93	0,00
Diâmetro Externo (cm)	2,51	0,91
Resistência em CC (Ω)	0,101	3,36

Os parâmetros da linha de transmissão foram calculados utilizando-se o modelo *JMartí* do programa ATPDraw, levando-se em consideração a sua dependência com a frequência [6].

Para o cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão foi considerada uma frequência inicial de 10 [Hz] e uma frequência da matriz de transformação de 250 [kHz], observando-se um tempo de crista de 1 [μs], considerando-se uma corrente impulsiva padrão do tipo 1,2x50 [μs]. A resistividade do solo foi assumida sendo igual a 1000 [ohm.m] [7].

2.3 Modelagem da Disrupção na Cadeia de Isoladores

A cadeia de isoladores é composta por 26 isoladores do tipo padrão com comprimento igual a 14,605 [cm] [8]. A modelagem da disrupção na cadeia de isoladores foi baseada na curva de suportabilidade TensãoxTempo [9] descrita pela Equação 3:

$$V(t) = 400W + (710W/t^{0,75}) \quad (3)$$

onde:

- t – instante de tempo de disrupção em [μs] (*time to breakdown*);
- V – tensão aplicada a cadeia de isoladores em [kV];
- W – comprimento da cadeia de isoladores em [m].

2.4 Sistema Elétrico Simulado

O sistema elétrico implementado neste trabalho está representado na Figura 3. Foram representadas três torres ao longo da linha de transmissão trifásica. A fonte de corrente de surto atmosférico é representada pelos componentes de N1 até N7, identificados pelos ícones *TACS HEIDLER* na Figura 3, criados a partir do recurso *DBM* do *ATP*. Cada um destes componentes representa uma função de *Heidler* com parâmetros da Tabela 1. A corrente resultante da soma das correntes criadas por cada uma das fontes de *Heidler*, denominada por *ISURTO* na Figura 3, é injetada no topo da torre central (Torre 2). No sistema elétrico foram representados quatro vãos de linhas. As linhas das extremidades possuem comprimentos de 10 [km]. O vão à esquerda da torre central possui comprimento de 500 [m] enquanto que o vão à direita possui comprimento de 600 [m]. A altura das torres é de 44,7 [m]. As torres foram representadas por dois trechos de linha de transmissão monofásicas, ligados em série, com comprimentos proporcionais a 2/3 (29,8 [m]) e a 1/3 (14,9 [m]) da altura da torre. Cada um dos dois trechos de linha de transmissão possui impedância de surto de 200 [Ω]. Os trechos de linha de transmissão monofásicos, utilizados para modelar a impedância das torres, foram representados pelo modelo *Transposed Lines (Clarke)*, com parâmetros distribuídos, do *ATPDraw*. A velocidade de propagação da onda eletromagnética na torre é considerada, em média, igual a 85% do valor da velocidade da luz.

As chaves instaladas entre os nós denominados VTORR1 e os condutores fases (VFA1VA, VFB1VA e VFC1VA), da Torre 1, registram as amplitudes das sobretensões resultantes impostas às cadeia de isoladores da fase 1. Neste sistema, uma chave *type-13* da *TACS* é fechada quando a diferença de potencial existente entre os seus terminais supera a suportabilidade dos isoladores. A mesma modelagem foi adotada para as Torres 2 e 3.

2.4 Sistema de Controle da Disrupção:

O modelo de cálculo das sobretensões resultantes, impostas às cadeias de isoladores, foi implementado através da utilização da rotina *TACS*, descrito em detalhes em [10]. Neste modelo computacional desenvolvido, a disrupção foi representada através do uso de uma chave comandada pela diferença de potencial, à qual a cadeia de isoladores é submetida. A amplitude deste surto de tensão foi medida através da ligação de uma chave entre as torres e os condutores fase da linha de transmissão, representada na Figura 3. Esta chave é do tipo controlada por pulso de disparo, disponível na *TACS*. Desta forma a diferença de potencial entre os terminais da chave controlada, representa a sobretensão imposta à cadeia de isoladores, durante o surto atmosférico.

2.5 Modelo LPM - Leader Progression Model

A implementação do modelo LPM foi realizada com a linguagem *MODELS* do *ATP*. A fase de propagação do *streamer* é completada quando o *streamer* percorre todo o comprimento do *gap* ou arranjo isolante. Em seguida, tem início a fase de propagação do *Leader*. O *Leader* desenvolve-se de acordo com a Equação 4, para o cálculo de sua velocidade, recomendada pelo CIGRE WG33-01 [11].

$$dL/dt = k_3 \cdot V \cdot [V/(D - L) - E_0] \quad (3)$$

onde:

- L - é o comprimento do *Leader* em [m];
- D - é o comprimento total da cadeia de isoladores [m];
- V – é a tensão instantânea aplicada à cadeia de isoladores [kV];
- E_0 - é o valor do campo elétrico crítico: 600 [kV/m]
- k_3 - é uma constante dependente do arranjo isolante: $1.3 [m^2.kV^{-2}.s^{-1}]$ para isoladores.

O procedimento de cálculo consiste na determinação da velocidade, em cada instante de tempo da simulação, determinando o comprimento total do *leader*, e subtraindo este valor do comprimento total do *gap*, para encontrar o novo valor do comprimento restante do *gap*, ainda não percorrido. A disrupção ocorre quando o *leader* cruza todo o comprimento do *gap* ou dois *leaders* se encontram no centro do *gap*.

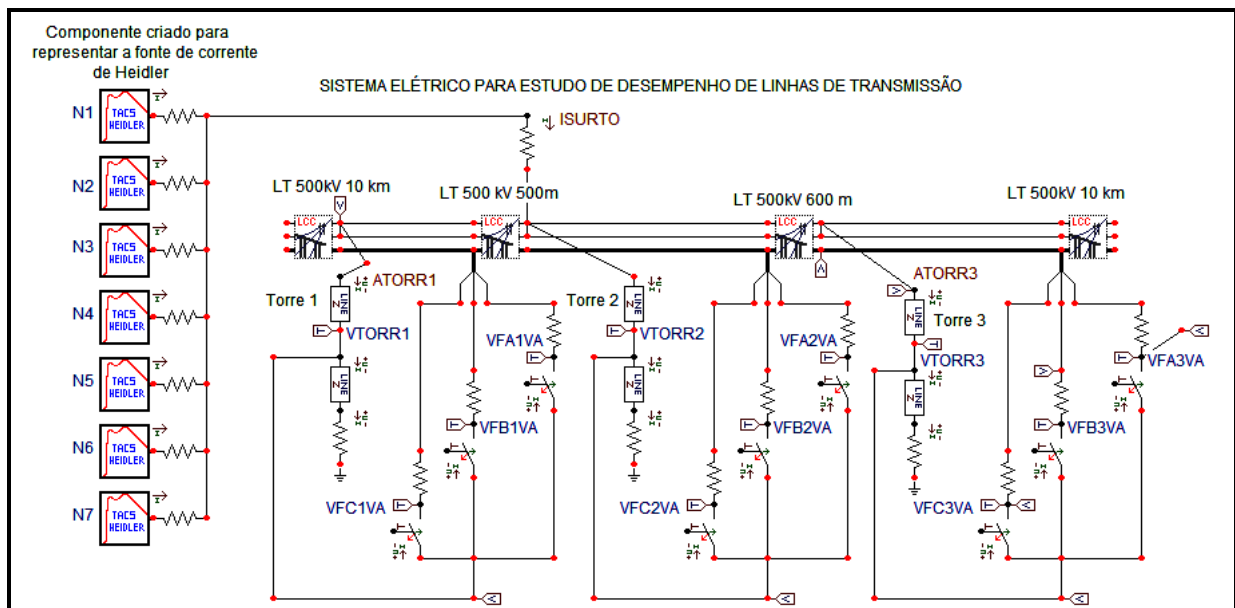


FIGURA 3 - Sistema elétrico implementado para estudos de desempenho de linhas de transmissão.

3.0 - RESULTADOS

Neste item serão analisadas as amplitudes das sobretensões que determinam a ocorrência de disrupções, devido ao fenômeno de *backflashover*. É identificado o valor de pico e a forma de onda do surto de tensão no condutor fase, em função da influência da impedância de pé de torre e dos modelos de disrupção implementados.

Para cada caso estudado, foram identificados os valores de corrente crítica de descarga atmosférica. Nos casos estudados a linha de transmissão não está energizada. Nos estudos de caso apresentados neste trabalho, avaliou-se a influência da resistência de aterramento somente da torre 2, central, atingida pela descarga elétrica, vide Figura 3. Dessa forma as resistências de terra das torres 1 e 3, adjacente à torre 2, foram consideradas com valores iguais a 1000 Ω .

3.1 Caso 1: Torre de descarga com resistência de aterramento igual a 60 ohms e Curva V-t Padrão.

Neste caso avalia-se somente a influência da resistência de aterramento da Torre 2, atingida pela descarga. A Figura 4 revela a ocorrência de disrupção na fase B da Torre 2, em $t = 14,27 \mu s$, quando a sobretensão atinge o valor de 1.8876 [MV]. Para este caso, a corrente crítica possui valor de pico igual a 81,679 [kA].

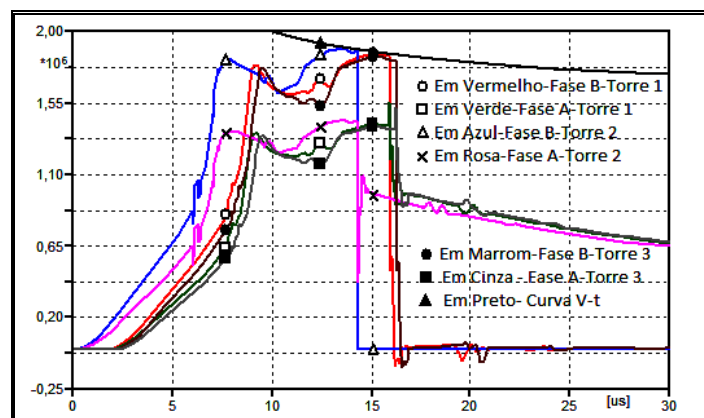


FIGURA 4 - Sobretensões atmosféricas entre Fase-Torre para resistência de aterramento igual a 60 ohms.

3.2 Caso 2: Torre de descarga com resistência de aterramento igual a 30 ohms e Curva V-t Padrão

Neste caso, percebe-se uma redução nas amplitudes das sobretensões, em função da redução do valor da resistência de aterramento da Torre 2 para o valor de 30 Ω , valor tipicamente encontrado para o tipo de solo do Estado de Minas Gerais.

A Figura 5-a apresenta a forma de onda das sobretensões impostas às cadeias de isoladores, para o mesmo valor de corrente crítica do Caso 1. A sobretensão máxima é de 1,2851 [MV], para a fase B da Torre 1, em $t = 9,03$ [μ s]. Neste caso, o valor de pico da corrente crítica de descarga aumenta para 129,58 [kA]. A Figura 5-b apresenta as formas de onda das sobretensões nas cadeias de isoladores, para uma descarga com amplitude de corrente igual ao valor da corrente crítica (129,58 [kA]). Para uma descarga com o valor da corrente crítica, a disrupção ocorre para a fase B da Torre 1, em $t=9,01$ [μ s], quando a sobretensão atinge o valor de 2,038 [MV].

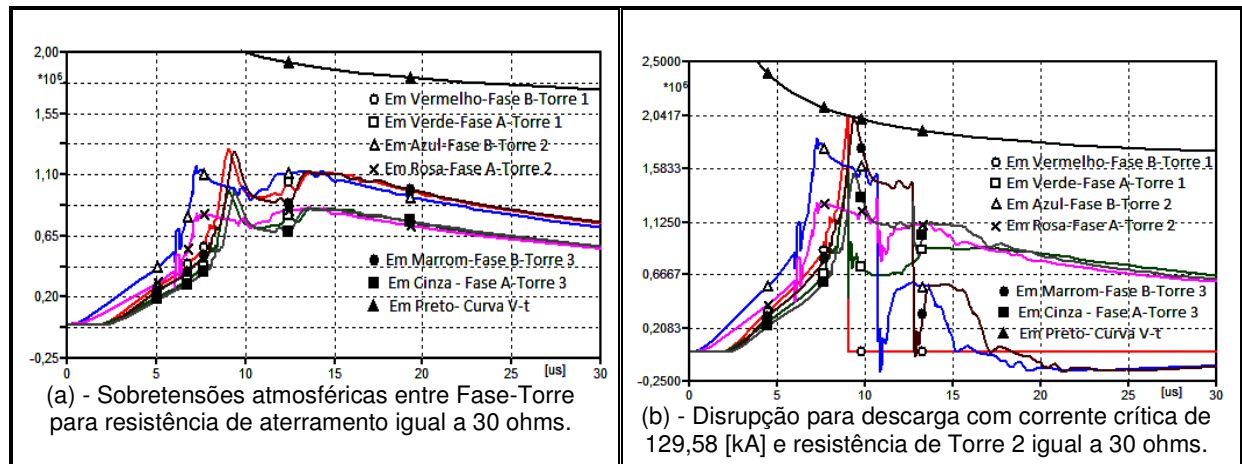


FIGURA 5 - Sobretensões atmosféricas entre Fase-Torre para resistência de aterramento igual a 30 ohms.

3.3 Caso 3: Casos 1 e 2 utilizando o Método LPM para representação da disrupção.

Os resultados apresentados na Figura 6 demonstram que a utilização do método LPM, para representação da disrupção, evidenciou a ocorrência de disrupção em instantes de tempo anteriores aqueles dos casos 1 e 2. Em ambas as simulações, a disrupção ocorreu na Fase B da Torre 2. Neste caso foram mantidos os valores de correntes críticas encontrados nos Casos 1 e 2, para resistências de aterramento iguais a 60 e 30 ohms.

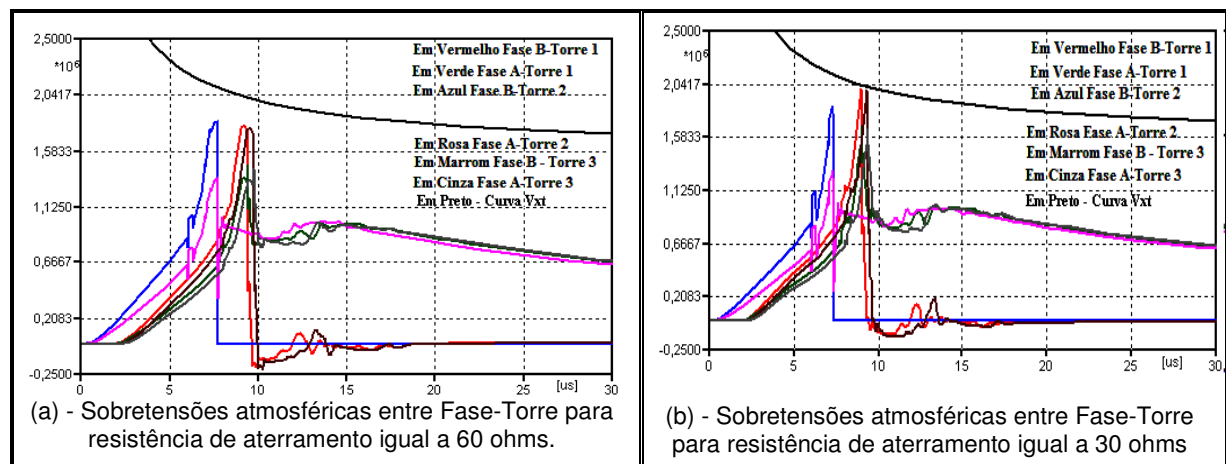


FIGURA 5 - Sobretensões atmosféricas entre Fase-Torre com utilização do Método LPM.

Na Figura 5(a) a disrupção no instante de tempo igual a 7,65 [μ s], quando a sobretensão na fase B da torre 2 atinge o valor de 1,824 [MV]. Na Figura 5(b), a disrupção ocorre quando a sobretensão na fase B da torre 2 atinge o valor de 1,848 [MV], no instante de tempo de 7,28 [μ s].

4.0 - CONCLUSÕES

O trabalho apresentou um modelo computacional implementado no ambiente do ATPDraw, adequado à análise de desempenho de linhas de transmissão, ante sobretensões originadas por descargas atmosféricas indiretas. Com a utilização de dispositivos da TACS, foi modelado um sistema de controle capaz de registrar o instante de tempo de ocorrência da disrupção, o local de ocorrência e a amplitude das sobretensões impostas às cadeias de isoladores, ao longo da linha de transmissão. Tal sistema de controle permite a realização de análises de sensibilidade para a otimização de projetos de coordenação de isolamento de linhas de transmissão.

Os resultados obtidos nos Casos 1 e 2 comprovam que a redução da amplitude da resistência de aterramento das torres, provoca uma atenuação das sobretensões nos isoladores, para o evento de backflashover. Ainda, os diferentes comprimentos de vãos adjacentes à torre de incidência da descarga, são determinantes para ocorrência de valores de pico de sobretensões em instantes defasados no tempo.

A utilização da função de Heidler permitiu uma representação bastante fiel da forma de onda das sobretensões atmosféricas reais, contribuindo para uma análise de desempenho das linhas de transmissão bastante realística.

A modelagem da disrupção pelo método LPM, proporcionou uma análise mais refinada e precisa, do desempenho de linhas de transmissão quando comparado à simples utilização da curva V-t, otimizando o comprimento necessário das cadeias de isoladores e, conseqüentemente, contribuindo para redução do número de desligamentos.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. F. M de Campos, "Cálculo de Sobretensões causadas por Descargas Indiretas em Linhas de Distribuição Aéreas Considerando Falhas de Isolamento," Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- [2] F. Heidler, J.M. Cvetic, B.V. Stanic, Calculation of Lightning Current Parameters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.2, April 1999.
- [3] L. C. Rocha, "Desempenho de linhas de transmissão EAT e UHT frente a descargas atmosféricas: Influência da ruptura em meio vão," Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- [4] S. Visacro, "A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke", Geophys. Res. Lett., vol. 31, L07112, 2004.
- [5] DE CONTI, A., VISACRO, S., "Analytical Representation of -Single and Double- Peaked Lightning Current Waveforms", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 04, No. 02, p. 448-451, 2007.
- [6] M. P. Pereira Filho, J. a. – "Curso básico sobre a utilização do ATP", CLAUE, Novembro/1996.
- [7] A.C. S. Lima, M. P. Pereira, O. Hevia, "Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão", Revista Iberoamericana Del ATP, Ano3. Vol.2, Número 3, Setembro, 2000.
- [8] D'Ajuz. Ary, Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Rio de Janeiro. FURNAS. Niterói. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE/EDUFF. 1987.
- [9] IEEE Std. 1243-1997 - Guide form Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, 1997.
- [10] Rodrigues, A. R.; Guimarães, G. C.; Chaves, M.L.R.; Boaventura, W. C. "Análise de Desempenho de Lnhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas aplicada à Coordenação de Isolamento." SBSE, Foz do Iguaçu-PR, Abril de 2014.
- [11] CIGRE WG 33-01, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines". CIGRE Brochure 63, 1991.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



André Roger Rodrigues nasceu em Patos de Minas, MG, Brasil, em 1979. Concluiu a graduação e o mestrado em Engenharia Elétrica nos anos de 2004 e 2007, respectivamente, pela FEELT-UFU-Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é aluno do curso de doutorado do COPEL-UFU, no núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos. Desde 2008, é professor do IFMG-Instituto Federal Minas Gerais-Campus Formiga. Suas áreas de interesse são: transitórios eletromagnéticos, conversão de energia, dinâmica de sistemas elétricos e geração distribuída.



Geraldo Caixeta Guimarães é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em 1977. Obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1984 e de Doutor (PhD), em Engenharia Elétrica pela University of Aberdeen, Aberdeen, Reino Unido, em 1990. Atualmente é professor da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU e suas pesquisas se concentram na área de energia eólica, geração distribuída, dinâmica e controle de sistemas elétricos, fluxo de carga, estabilidade transitória e de tensão.



Marcelo Lynce Ribeiro Chaves nasceu em Ituiutaba, MG, Brasil em 1951. Obteve o título de Doutorado em 1995 pela Unicamp, Campinas, Brasil. O título de Mestrado foi obtido em 1985, na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a Graduação em Engenharia Elétrica obtido em 1975, também pela Universidade Federal de Uberlândia. É professor titular na Universidade Federal de Uberlândia. Suas áreas de pesquisa incluem transitórios eletromagnéticos e dinâmica de sistemas elétricos.



Wallace do Couto Boaventura nasceu no Brasil em 1965. Ele tem graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 1988 e 1990, respectivamente. Obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Campinas, Campinas, Brasil, em 2002. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG desde 1992. Suas áreas de pesquisa incluem compatibilidade eletromagnética e processamento de sinais aplicados aos sistemas elétricos de potência.