

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA CORRENTE DE RETORNO EM DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

¹André Roger Rodrigues, ²Márcio Augusto Tamashiro, ²Anderson Rodrigo Piccini,
³Jaqueline Oliveira Rezende, ³Geraldo Caixeta Guimarães, ³Marcelo Lynce Ribeiro Chaves
¹IFMG-Campus Formiga, ²IFTO - Campus Palmas; ³UFU-FEELT
andre.roger@ifmg.edu.br, tamashiro@ifto.edu.br, anderson@ifto.edu.br,
jaqueline.oliveirarezende@gmail.com, gcaixeta@ufu.br, lynce@ufu.br

Resumo - O artigo apresenta a modelagem computacional implementada no software ATPDraw, 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 de um novo módulo no ATPDraw, que atua como fonte de corrente, baseada na função de Heidler, mostrou-se bastante adequada para a representação mais realística das principais características das formas de onda das correntes de retorno registradas em medições. Essa estratégia de modelagem é de grande relevância para a condução de estudos de coordenação de isolamento de linhas de transmissão, permitindo uma análise mais confiável do seu desempenho elétrico frente à sobretensões de origem atmosférica. Neste trabalho são apresentados e discutidos casos de análise de desempenho elétrico de uma linha de transmissão de 500 kV devido ao fenômeno de *backflashover*. Um sistema de controle capaz de registrar a amplitude das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores, ao longo dos vãos adjacentes ao ponto de incidência da descarga, também foi implementado. Este sistema de controle que representa a disrupção também permite a determinação tanto da amplitude da corrente crítica de descarga atmosférica, bem como do instante de tempo de ocorrência da disrupção sobre cadeias de isoladores.

Palavras-Chave – ATPDraw, Backflashover, Coordenação de Isolamento, Descargas Atmosféricas, Desempenho de Linha de Transmissão, TACS.

COMPUTATIONAL MODELING OF LIGHTNING RETURN STROKE-CURRENT FOR PERFORMANCE ANALYSIS OF TRANSMISSION LINES.

Abstract - This paper presents a computational modeling performed at ATPDraw of lightning currents with typical waveshapes extracted from measurement data of Morro do Cachimbo station. The obtained results with the

creation of a new module at ATPDraw, which acts as a current source, based on Heidler function, proved to be very suitable for a realistic representation of the main features of lightning current waveshapes recorded in measurements. This modeling strategy is of great significance to perform insulation coordination studies of transmission lines, allowing a more reliable analysis of their electrical performance against atmospheric overvoltages. This paper also presents and discusses some cases of electrical performance analysis carried out in a 500 kV transmission line due to backflashover phenomenon. A control system was developed in order to register the overvoltage amplitude established at insulator strings throughout the adjacent spans to the lightning strike tower. This control system is able to represent the disruption along line insulators also permits the identification of both critical current amplitude and disruption occurrence time on insulator strings.

Keywords – ATPDraw, Backflashover, Insulation Coordination, Lightning, Transmission Line Performance, TACS.

I. INTRODUÇÃO

No projeto de coordenação de isolamento de uma linha de transmissão é importante determinar o seu nível básico de isolamento a impulso atmosférico. Tal valor é dependente do nível de suportabilidade de tensão da linha de transmissão estabelecido pelas cadeias de isoladores. 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 em ensaios laboratoriais dos isoladores, que são submetidos a tensões com forma de onda de impulso atmosférico padronizada. As tensões de ensaio a impulso atmosférico possuem formato bi-exponencial do tipo 1,2/50 μ s 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.



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

Contudo, medições de correntes de descarga registradas na estação do Morro do Cachimbo em MG [1] 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 representar adequadamente 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 componente modelado no software ATPDraw, capaz de atuar como uma fonte de corrente com forma de onda estabelecida pela função de Heidler. A forma de onda gerada pela fonte de corrente de Heidler, modelada no ATPDraw, 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, formado por quatro vãos, com o intuito de determinar o surto de tensão no condutor fase para a condição de descarga indireta, quando da incidência de uma descarga atmosférica na torre da linha de transmissão. 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 o instante de tempo de sua ocorrência.

Em estudos de coordenação de isolamento, a representação adequada da impedância característica da torre da linha de transmissão e o valor da resistência de aterramento, utilizada na modelagem computacional, são parâmetros determinantes da amplitude das sobretensões de origem atmosférica que podem acarretar a disrupção sobre a cadeia de isoladores.

Nos sistemas de transmissão, os cabos pára-raios desempenham a função de proteção contra desligamentos de linha devido ao fenômeno de flashover, ao evitar a ocorrência da descarga atmosférica diretamente sobre os cabos fase. As descargas atmosféricas diretas ou falhas de blindagem incidem sobre uma fase da linha, produzindo uma sobretensão ao longo da fase atingida, com probabilidade de disrupção ao longo da cadeia de isoladores. As descargas indiretas podem incidir tanto sobre os cabos de blindagem ou cabos-guarda, quanto sobre a torre, produzindo um arco elétrico de contornamento da cadeia de isoladores instalada entre a torre e uma fase da linha. Este fenômeno é conhecido como *backflashover* [4]. Neste último caso a impedância de

aterramento da torre é determinante para a ocorrência ou não da falta, devendo ser adequadamente analisada.

As correntes que percorrem os cabos são conduzidas para o solo através de estruturas metálicas aterradas, que geralmente são as torres. Ao percorrer a impedância do cabo, a corrente elétrica de surto atmosférico produz uma onda de sobretensão, que propaga ao longo da linha, em direção às torres adjacentes. Ao atingir a torre vizinha, esta sobretensão pode superar o nível de isolamento da linha, dando origem a um arco elétrico ao longo dos isoladores que separam o cabo fase da parte metálica da torre, estabelecendo-se um curto-circuito fase-terra, caso a tensão de operação da rede seja capaz de sustentar o arco após o fluxo da corrente de descarga. O sistema de proteção da linha, que tem seus relés sensibilizados pelo fluxo da corrente de curto-circuito, comanda o desligamento desta.

II. 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.

A. 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 [5]. 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 do pico.

A função de Heidler é dada pela equação abaixo:

$$F(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^{1/n}}{1 + (t/\tau_1)^{1/n}} e^{(-t/\tau_2)} \quad (1)$$

Onde:

I_0 - 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 por:

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

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.

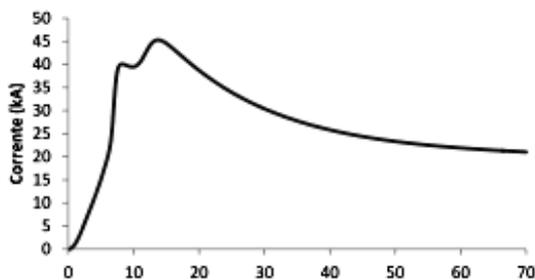
Baseado nos trabalhos de Visacro [5] e De Conti [6], a corrente de retorno foi aqui representada pela soma de sete funções de Heidler. Os parâmetros das funções de Heidler propostos em De Conti [6], utilizados para representar as primeiras descargas de retorno medianas obtidas das medições na estação do Morro do Cachimbo foram extraídos de [1] e são apresentados na Tabela I.

Tabela I - Parâmetros utilizados para modelagem da fonte de corrente de Heidler.

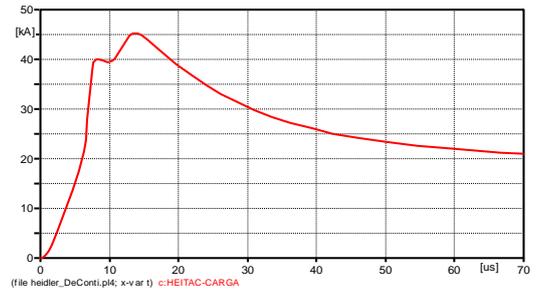
Forma de Onda	I_0 [kA]	n	τ_1 [μ s]	τ_i [μ s]
1	6	2	3	76
2	5	3	3,5	10
3	5	5	4,8	30
4	8	9	6	26
5	16,5	30	7	23,2
6	17	2	70	200
7	12	14	12	26

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 I, compõem a forma de onda de correntes medianas de retorno mostradas na Figura 1.a. A fonte de Heidler implementada computacionalmente no ATPDraw é mostrada na Figura 1.b, para fins de comparação e validação do módulo criado.



(a) Forma de onda utilizada para representar correntes medianas de primeiras descargas de retorno medidas na Estação Morro do Cachimbo [1].



(b) Forma de onda da fonte de corrente de Heidler criada no ATPDraw.

Fig. 1 - Forma de onda da corrente de descarga representadas por funções de Heidler.

B. 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 pára-raios, e influencia nas amplitudes de sobretensões resultantes da incidência de descargas atmosféricas. Devido a grande variedade de torres existente, 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.

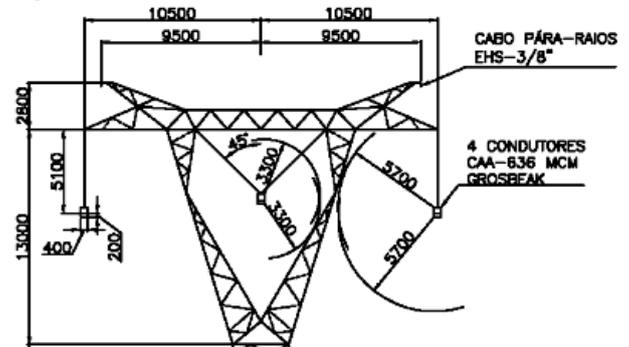


Fig. 2. Geometria da torre do tipo convencional de linha trifásica de 500 kV.

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

TABELA II
 Dados Elétricos e Mecânicos dos Cabos

Nome do Cabo	Grosbeak	EHC 3/8"
Tipo	CAA	EHS Classe C
Comprimento do Vão (m)	600	600
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 JMarti do programa ATPDraw, levando-se em consideração a sua dependência com a frequência [7].

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 μ s, considerando-se uma corrente impulsiva padrão do tipo 1,2x50 μ s. A resistividade do solo foi assumida sendo igual a 1000 ohm.m [8].

C. Modelagem da Disrupção na Cadeia de Isoladores

A modelagem da disrupção na cadeia de isoladores foi baseada na curva de suportabilidade TensãoxTempo [9] descrita por (3):

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

onde:

t – instante de tempo de disrupção em μ s (*time to breakdown*);

V – tensão aplicada a cadeia de isoladores em kV;

W – comprimento da cadeia de isoladores em m.

A cadeia de isoladores é composta por 26 isoladores do tipo padrão com comprimento igual a 14,605 cm [10].

A amplitude do surto de tensão ao qual a cadeia de isoladores fica submetida durante a descarga atmosférica foi medida através da ligação de uma chave entre a torre e a fase da linha de transmissão, representada no sistema elétrico simulado. 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 a cadeia de isoladores durante o surto atmosférico.

D. Sistema Elétrico Simulado

O sistema elétrico implementado neste trabalho está representado na Fig. 4. 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 4, criados a partir do recurso *Data Base Modularization* do ATP, conforme descrito no item II.A. Cada um destes componentes representa uma função de Heidler com parâmetros da Tabela I. A corrente resultante da soma das correntes criadas por cada uma das fontes de Heidler, denominada por ISURTO na Figura 4, é injetada nos cabos de blindagem localizados no topo da torre central (Torre 2). No sistema elétrico foram representados 4 vãos de linhas. As linhas das extremidades possuem comprimentos de 10 km. O vão a esquerda da torre central possui comprimento de 500 m enquanto que o vão a 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, conforme [11]. 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 à cadeia de isoladores de cada fase. Neste sistema, a chave controlada por 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.

E. 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 disponível na plataforma computacional ATP (Alternative Transients Program).

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. O sistema de controle está representado na Fig. 5.

De forma geral, o sistema de controle da chave da TACS que representa a disrupção opera baseado na seguinte lógica:

- i. As sobretensões existentes entre a torre 1 (VTORR1) e as fases (VFA1VA, VFB1VA e VFC1VA) são aplicadas às entradas de um dispositivo somador, sendo utilizadas para o cálculo das diferenças de potenciais impostas às cadeias de isoladores de cada fase desta torre. O módulo desta sobretensão é então calculado.
- ii. No instante de tempo no qual o módulo das sobretensões torna-se maior ou igual à curva de suportabilidade V_{xt} , um comparador gera os pulsos (DISP1A, DISP1B e DISP1C) com amplitude igual a 5;
- iii. Os pulsos gerados pelos comparadores do passo anterior são aplicados aos dispositivos *Sample&Track* que registram o instante de tempo em que estes tornam-se positivos e geram os pulsos de disparo (VGAT1A, VGAT1B e VGAT1C), com amplitude igual a 5, para as chaves controladas das fases A, B e C, respectivamente, da torre 1.
- iv. As chaves da TACS mostradas no sistema elétrico da Fig. 4 são controladas pelos pulsos gerados no passo anterior. Quando os pulsos forem positivos (>0), situação na qual a sobretensão na cadeia supera a curva V_{xt} , as chaves são fechadas simulando a disrupção através da cadeia de isoladores. Com os pulsos VGAT1A, VGAT1B e VGAT1C aplicados às chaves das fases A, B e C da torre 1, ocorre a injeção de corrente de curto-circuito nas fases da linha de transmissão trifásica. Este sistema de controle foi também aplicado as torres 2 e 3.

Componente criado para representar a fonte de corrente de Heidler

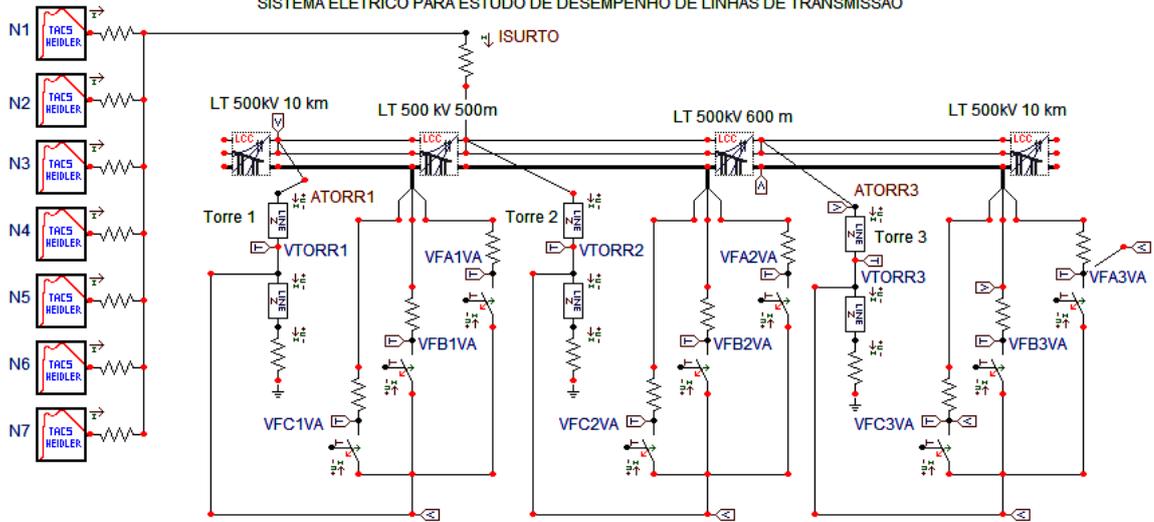


Fig. 4. Sistema elétrico implementado para estudos de desempenho de linhas de transmissão.

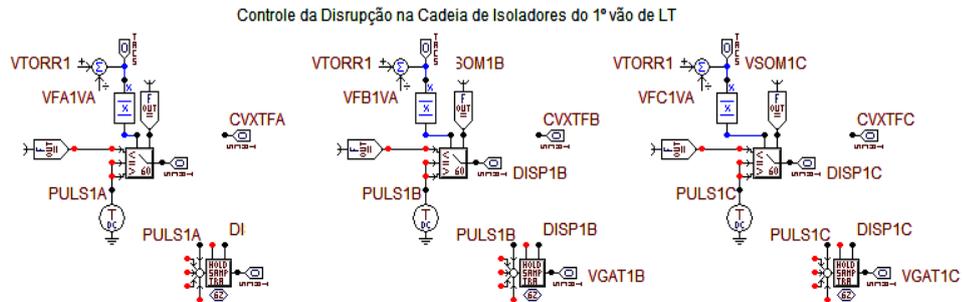


Fig. 5. Sistema de controle da chave da TACS que representa a disrupção sobre a cadeia de isoladores.

III. 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. Também é apresentada uma análise da influência da impedância de pé de torre na ocorrência da disrupção.

Para cada caso estudado, foram identificados os valores de corrente crítica de descarga atmosférica, ou seja, o menor valor de corrente capaz de produzir uma disrupção. Nos casos estudados a linha de transmissão não está energizada.

1) *Caso 1: Torre de descarga com resistência igual a 60 Ω e torres adjacentes com resistências iguais a 1000 Ω.*

Neste caso avalia-se somente a influência da resistência de aterramento da Torre 2 atingida pela descarga. A Figura 6 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 81,679 kA, no segundo pico da corrente de retorno.

2) *Caso 2: Torre de descarga com resistência igual a 30 Ω e torres adjacentes com resistências iguais a 1000 Ω.*

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 mineiro.

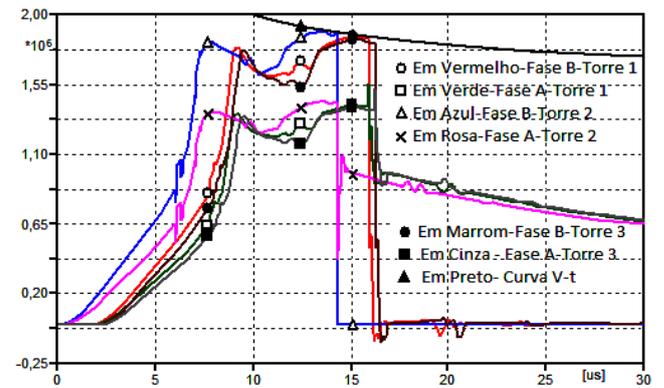


Fig. 6. Sobretensões atmosféricas para resistência de terra igual a 60 ohms.

A Figura 7 apresenta a forma de onda das sobretensões impostas às cadeias de isoladores. A sobretensão máxima é de 1,2851 MV, para a fase B da Torre 1, em $t = 9,03 \mu s$. Neste caso, o valor de pico da corrente crítica de descarga aumenta para 129,58 kA, para o segundo pico da forma de onda da corrente de retorno. A Figura 8 apresenta as formas de onda das sobretensões nas cadeias de isoladores, para uma descarga com amplitude de corrente igual ao valor da corrente crítica.

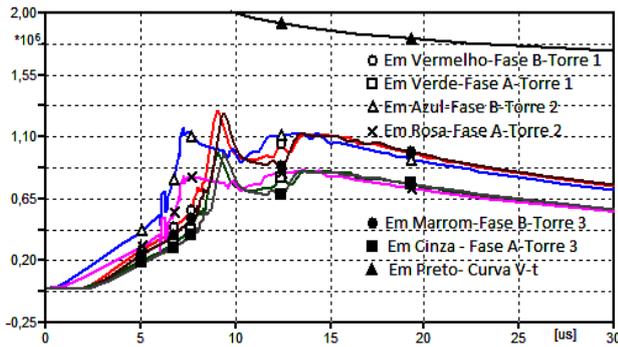


Fig. 7. Sobretensões atmosféricas para resistência de terra igual a 30 ohms.

Para uma descarga com amplitude igual ao valor da corrente crítica (129,58 kA), a disrupção ocorre para a fase B da Torre 1, em $t=9,01 \mu s$, quando a sobretensão atinge o valor de 2,038MV, conforme mostrado na Figura 8.

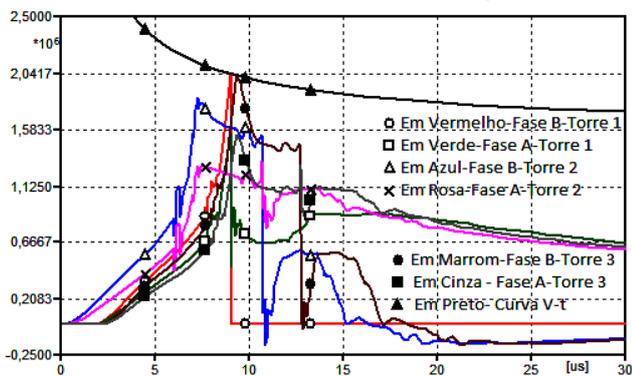


Fig. 8. Ocorrência de disrupção para resistência de terra igual a 30 ohms.

IV. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou um modelo computacional implementado no ambiente do ATPDraw adequado à análise de desempenho de linhas de transmissão frente à 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 otimização de projetos de coordenação de isolamento de linhas de transmissão. Mesmo sem a implementação do LPM (Leader Progression Model), para modelar adequadamente a disrupção, o sistema de controle modelado no ATPDraw permite uma avaliação do desempenho da linha.

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. Consequentemente, linhas com menores valores de resistência de aterramento suportam correntes de descarga atmosférica com maiores amplitudes, contribuindo para a melhoria do desempenho elétrico de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Os diferentes comprimentos de vãos adjacentes à torre de incidência da descarga, determinam a ocorrência de valores de pico de sobretensões em instantes defasados no tempo.

Dessa forma, o projeto de coordenação de isolamento também deve considerar os comprimentos dos vãos para avaliar o desempenho de linhas de transmissão frente a surtos atmosféricos, de forma a otimizar o comprimento das cadeias de isoladores e reduzir o número de desligamentos.

REFERÊNCIAS

- [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, Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia, vol. I. São Paulo. Ed. Artliber, 2005.
- [5] S. Visacro, "A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke", Geophys. Res. Lett., vol. 31, L07112,2004.
- [6] 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.
- [7] M. P. Pereira Filho, J. A. – "Curso básico sobre a utilização do ATP", CLAUPE, Novembro/1996.
- [8] 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.
- [9] IEEE Std. 1243-1997 - Guide form Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, 1997.
- [10] 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.
- [11] P.C. A. Mota, "Um estudo sobre tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão." Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2001.