



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GDS/04
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
UTILIZANDO O MÉTODO DE MONTE CARLO**

**Marco Aurélio de Oliveira Schroeder(*)
José Antônio de Souza Mariano
Warley de Sousa Sales
Luiz Carlos do Nascimento
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEPEL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI - UFSJ**

**Sandro de Castro Assis
COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS
GERAIS-DISTRIBUIÇÃO S/A (CEMIG-D)**

RESUMO

Sobretensões de origens atmosféricas em sistema de transmissão de energia constituem-se em problemas de natureza estocástica e são consideradas as principais causadoras de desligamentos não programados em linhas de transmissão de até 230 kV. Neste contexto, a coordenação de isolamento frente a descargas atmosféricas deve ser tratada segundo uma abordagem probabilístico-estatística. Dado o acelerado desenvolvimento de recursos computacionais, o Método de Monte Carlo tem se constituído em uma alternativa atrativa. Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, baseada no Método de Monte Carlo, projetada para integrar a praticidade do *Matlab*[®] com as rotinas internas do ATP (*Alternative Transients Program*), bem como sua potencialidade na obtenção de taxas de desligamento (devido a *backflashover* e *flashover*) de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. A utilidade prática da ferramenta computacional em causa, em termos de uma gama variada de resultados, é demonstrada por meio da aplicação a uma linha típica de 138 kV que pertence ao sistema de distribuição da CEMIG-D.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Descargas Atmosféricas, Sobretensões Atmosféricas, Abordagem Estocástica, Método de Monte Carlo, *Alternative Transients Program* (ATP).

1.0 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão devem ser projetados assegurando altos índices de confiabilidade operacional, de maneira a minimizar a quantidade de paradas não programadas que se traduzem, não apenas em elevados custos, associados à interrupção dos serviços, mas também em implicações de ordem social. Tem sido extensamente reportado na literatura que a maior parte das saídas de linhas de transmissão, em sistemas com tensões nominais iguais ou inferiores a 230 kV, resulta da interação danosa entre as descargas atmosféricas e os sistemas de energia. No Brasil, por exemplo, dados da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), revelam que aproximadamente 70% dos desligamentos de sua rede de transmissão se devem às descargas atmosféricas, sendo que cerca de 20% destes, são desligamentos permanentes (1), (2). Embora os sistemas elétricos operem em regime permanente senoidal, durante grande parte do tempo, o isolamento, entre os condutores ativos e as partes metálicas aterradas, deve ser projetado para suportar as pronunciadas sobretensões, de origem interna (reconfigurações topológicas, por exemplo) e externa (descargas atmosféricas). Desta forma, o isolamento é dimensionado para resistir a solicitações com diferentes formas, polaridades, duração e intensidades (3). A confiabilidade do sistema é condicionada a limites estruturais e de viabilidade econômica, de maneira que um projeto factível sempre admite uma probabilidade de falha não nula. As descargas atmosféricas podem incidir nos cabos fase, cabos para-raios ou na estrutura das torres de transmissão, desenvolvendo sobretensões cujos níveis de campo elétrico associados são capazes de promover a ruptura da rigidez dielétrica das cadeias de isoladores, causando curto-circuitos que podem resultar no desligamento da linha. Neste sentido, a engenharia de proteção tem por objetivo atuar na adequação dos elementos do sistema, considerando a alocação de componentes que proporcionem medidas corretivas, visando mitigar os efeitos nocivos destas interações indesejadas. Diante da

(*) Praça Frei Orlando, n° 170, Bairro: Centro – sala 4.14-EL – Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
– Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL) – CEP 36.307-352, São João del-Rei, MG, – Brasil
Tel: (+55 32) 3379-2530 – Fax: (+55 32) 3379-2525 – Email: schroeder@ufs.br

complexidade do problema, inúmeras metodologias de estimação, fundamentadas na adoção de premissas simplificadoras particulares e na aplicação de modelos com diferentes graus de detalhamento, têm sido objeto de contínua investigação. Consequentemente, estudos relacionados ao desenvolvimento de modelos e técnicas de simulação, que subsidiem práticas mais eficientes de proteção, são completamente justificados. Dada a natureza estocástica das descargas atmosféricas e considerando que os parâmetros do sistema apresentam-se com incertezas, o cálculo mais preciso do desempenho frente às referidas solicitações deve ser baseado em uma abordagem probabilístico-estatística. Após uma revisão no tema sob investigação, percebe-se uma carência de ferramentas computacionais que possibilitem a realização sistemática dos cálculos das taxas de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas. Motivado por esta carência, fez-se a opção de desenvolver e implantar um ambiente computacional que proporcione, de forma integrada, avaliações de transitórios eletromagnéticos em sistemas de transmissão, com a inclusão de comportamentos estocásticos de alguns elementos presentes nos processos citados via Método de Monte Carlo. Desta forma, é desenvolvido o **Ambiente Computacional** segundo uma **Abordagem Estocástica** para cálculo de **Desempenho de Linhas de Transmissão**, denominado **ACAE-DLT**, que combina as vantagens do ambiente de computação científica Matlab® com as potencialidades do *Alternative Transients Program* (ATP). O **ACAE-DLT** possibilita análises de sobretensões e desempenho de linhas com as seguintes características: i) interface amigável; ii) cálculo do transitório eletromagnético; iii) modelagens fisicamente consistentes dos diversos elementos presentes no processo, com destaque para a interrupção nas cadeias de isoladores; iv) avaliações paramétricas dos elementos que influenciam no desempenho. Tem-se a expectativa de que a ferramenta proposta possa auxiliar práticas de proteção mais eficientes e servir como base para o desenvolvimento de inúmeras atividades de pesquisa.

2.0 - DESCRIÇÃO DO ACAE-DLT

2.1 *Alternative Transients Program* (ATP)

O modelo de simulação de um caso genérico é passado ao ATP por meio de um arquivo padronizado, que pode ser editado em qualquer processador de textos, que suporte o formato *ASCII*. O arquivo principal de entrada, que possui extensão *.ATP pode ser gerado pelo editor gráfico de circuitos (e.g. ATPDraw) ou diretamente no editor de textos, seguindo um formato de alocação de informações rigidamente preestabelecido (4), (5). Estes dados são interpretados e processados pelo núcleo do programa, geralmente nomeado TPBIGX.EXE, que gera os arquivos de listagem *.LIS e de resultados *.PL4. Além da listagem do estudo, o arquivo *.LIS apresenta uma crítica do arquivo de entrada a partir da qual é possível verificar erros de sintaxe, de alocação incorreta de dados e inconsistências lógicas na estrutura de sub-rotinas acopladas. Os resultados são apresentados na forma de vetores em colunas para tratamento posterior ou exibição gráfica em ferramentas apropriadas. Diversos trabalhos têm sido publicados com o objetivo de estabelecer um padrão na representação dos componentes e equipamentos conectados ao sistema de potência, para estudos de coordenação do isolamento em linhas e em subestações frente à incidência de descargas atmosféricas, (6), (7), (8). Os principais modelos, aproximações e considerações são os seguintes:

a) Linhas aéreas de transmissão - representadas por sistemas polifásicos, capazes de caracterizar adequadamente a natureza distribuída de seus parâmetros e, preferencialmente, a dependência dos mesmos com a frequência. É necessário que os cabos aéreos sejam explicitamente modelados entre as torres, sendo que apenas alguns vãos de linha são normalmente considerados. Como uma regra prática para a seleção do número de vãos que devem ser modelados, pode-se adotar uma quantidade para a qual o tempo de trânsito entre a torre atingida e a torre mais distante é maior que a metade do maior tempo de frente das ondas incidentes (6). Em geral, em sistemas blindados, a alocação de mais que três torres adjacentes não afeta o resultado de forma apreciável. Por outro lado, em torres não blindadas, é necessário representar uma quantidade maior de vãos (dezoito em média). O truncamento da sequência de vãos é conseguido com o casamento de impedâncias. O ATP dispõe de três classes de modelos e rotinas auxiliares para a representação de linhas aéreas de transmissão, adequadas à simulação de fenômenos transitórios com diferentes faixas de variação de frequência, quais sejam (9): modelos a parâmetros concentrados¹; modelos a parâmetros distribuídos constantes com a frequência²; e rotinas auxiliares (*Bergeron*, *J. Martí*, *Semlyen* e *Noda setups*). Os modelos gerados pelas rotinas auxiliares destacam-se como os mais interessantes para estudos estatísticos de desempenho.

b) Torres - representadas como um feixe de múltiplos condutores ou um equivalente monofásico que é representado por um condutor filamentar com parâmetros distribuídos e sem perdas (aproximação razoável para torres com alturas inferiores a trinta metros; para torres mais altas, modelos mais sofisticados e detalhados podem ser necessários para quantificar, de forma mais precisa, as atenuações e distorções das ondas de tensão e corrente). A impedância de surto é um parâmetro dependente do nível de detalhamento da estrutura (valores típicos entre 100 e 300 Ω). Para computar os atrasos gerados pela propagação do surto, por meio dos caminhos paralelos do sistema de treliças, assume-se que as ondas percorrem a estrutura com uma velocidade igual a 80 % da velocidade de propagação da luz no espaço livre ($0,8 c = 0,8 \times 3 \times 10^8$ m/s).

c) Aterramento elétrico - aspecto crítico e uma caracterização realista capaz de traduzir o comportamento não linear, complexo e dependente da frequência ainda é objeto de investigação. O modelo de resposta em baixa frequência é bastante utilizado, considerando ou não os processos de ionização nos casos em que correntes de elevada amplitude estão envolvidas. Entretanto, correntes de descarga apresentam uma parcela significativa de

¹ Os modelos a parâmetros concentrados não são apropriados para simular o mecanismo de propagação de ondas.

² Os modelos a parâmetros distribuídos e constantes com a frequência necessitam de ajustes de configuração, como por exemplo, impedâncias de surto e de sequência, que os torna inadequados para as múltiplas simulações requeridas pelo Método de Monte Carlo.

componentes de alta frequência, principalmente nos primeiros microssegundos de ocorrência, o que requer dos modelos a consideração da variação dos parâmetros (resistividade e permissividade) com a frequência, a composição real da corrente no solo (deslocamento e condução) e os acoplamentos mútuos entre eletrodos (10), (11). Em uma primeira aproximação, os resultados deste artigo foram obtidos modelando os eletrodos de aterramento por resistores lineares a parâmetros concentrados (com valores iguais à impedância impulsiva, Z_p).

d) Tensões de operação na frequência industrial - consideradas pela alocação de fontes de excitação senoidais ou fontes contínuas equivalentes. Em estudos probabilísticos, o ângulo de referência deve ser considerado como uma variável aleatória com distribuição uniforme entre 0° e 360° .

e) Canal de descarga - modelado por um gerador impulsivo de corrente (solicitações experimentalmente observadas) conectado ao ponto de incidência. A impedância do canal pode ser considerada por um resistor linear em paralelo com o gerador (entre 100 e 3.000 Ω). O ATP dispõe de inúmeras representações, como por exemplo: rampa triangular, dupla exponencial, Cigré e função de Heidler (12).

f) Cadeias de isoladores - modeladas por chaves controladas por tensão ou por resistores não lineares considerando ou não os acoplamentos. Estes modelos de disrupção não fazem parte das bibliotecas de componentes do ATP e devem ser integrados com o auxílio de rotinas especiais. Neste sentido, os elementos TACS (*Transients Analysis Control Systems*) e as *Models* (13), introduzem grande flexibilidade na expansão das funcionalidades do programa, por meio do acoplamento de sub-rotinas internas e ou externas ao ATP (4). Neste artigo, a rotina *Models* do ATP é utilizada no desenvolvimento dos três modelos de disrupção das cadeias de isoladores (14): i) Método de Integração (15)-(19); ii) Curva de Suportabilidade Tensão-Tempo, (20) e iii) Modelo de Progressão do *Leader* (6).

g) Passo de integração - a precisão da simulação digital pode ser comprometida pela seleção inadequada do passo de integração (depende da inclinação da frente de onda e do tamanho do menor segmento dos elementos modelados por parâmetros distribuídos). Como uma regra prática, sugere-se que o passo de simulação esteja compreendido entre um e vinte nano-segundos e que o máximo tempo de simulação esteja no intervalo entre vinte e cinquenta microssegundos.

2.2 Interface ATP e Matlab®

Para gerenciar o fluxo de dados, monitorar variáveis de controle e desempenhar os cálculos estatísticos necessários, compondo uma interface limpa e explicativa, é selecionado o ambiente de computação científica *Matlab*®. Tal escolha é pautada nas seguintes características e funcionalidades deste programa: i) possui um amplo conjunto de funções matemáticas internas para geração, ajuste e tratamento de dados estatísticos; ii) contém cálculos numéricos cujo tempo de execução, das funções para o problema estudado, é comparativamente menor em relação ao tempo combinado das operações em disco e simulação do transitório, por exemplo; iii) possibilita a criação de interfaces gráficas para usuários; iv) é um sistema interativo que integra capacidade de cálculos, de visualização gráfica e de programação. Após a entrada dos dados necessários para o cálculo do transitório no ATP, o próximo passo a ser executado é a especificação dos parâmetros da simulação Monte Carlo e do modelo de incidência. Com todos estes parâmetros e especificações do caso base definidos, o arquivo principal *.ATP é estruturado e executado pelo núcleo do ATP, resultando em uma saída formatada, que serve para atualizar as variáveis de controle da simulação no *Matlab*®. Este processo é repetido até que os critérios de convergência sejam satisfeitos, atribuindo novos valores para as variáveis estocásticas consideradas, de acordo com distribuições de probabilidades definidas, a cada nova execução (17). A inserção destes valores é realizada editando o arquivo *.ATP quando a amostra gerada implica em uma interação descarga-linha (14).

2.2.1. Interface Gráfica de Usuário

Com o objetivo de facilitar o trabalho de configuração dos parâmetros descritos na seção anterior e, consequentemente, permitir a obtenção de resultados minimizando o esforço necessário na configuração dos modelos, foi desenvolvida uma interface gráfica de usuário, com os recursos disponíveis no *Matlab*®. A interface implementada é composta por duas telas. A primeira (Figura 1) é utilizada para especificar o modelo de linha e dos componentes do sistema. A segunda (Figura 2) é empregada para configurar particularidades da simulação probabilística (distribuições estatísticas ajustadas para a região onde a linha está inserida, critérios de convergência etc.) e do Modelo Eletrogeométrico (MEG), (14).

2.2.2. Geração de Números Aleatórios

As observações aleatórias dos parâmetros da corrente de retorno, da posição do canal, da impedância de aterramento e do ângulo de referência da tensão de operação podem ser obtidas por meio da aplicação da técnica da transformada inversa da função acumulada. No Método de Monte Carlo, a cada nova execução, as coordenadas (x,y) do canal de descarga são obtidas a partir de distribuições uniformes de probabilidades contendo os valores amostrados (U_x, U_y). O MEG é utilizado para definir a largura lateral da zona de estudo ($W = 2 y_{\max}$ km), cujo comprimento é $L = 10$ km, de forma a resultar em taxas de desligamento com a dimensão de Desligamentos/100 km/ano. Dentro desta área, a amostra relativa à posição (Equação 1) pode definir uma incidência no solo ou na linha, sendo "a" e "b" constantes que definem a amplitude do intervalo de amostragem e o deslocamento com relação à referência do plano cartesiano. Para determinar a macrorregião de ocorrência, é adotado o critério utilizado pelo programa *Flash*, o qual estabelece que aproximadamente 60 % das interações descarga-linha acontecem no topo das estruturas metálicas das torres, (21) - Equação 2. Se a observação gerada determinar uma interação descarga-linha, é necessário estabelecer o ponto exato de conexão do canal de descarga (Figura 3). As variáveis consideradas no **ACAE-DLT**, e suas distribuições de probabilidades são mostradas na Tabela 1. As amostras de cada variável podem ser obtidas dispondo-se de um gerador de números pseudoaleatórios (14).

$$y = a + (b - a)U_y \quad (1)$$

$$x = \begin{cases} \text{Topo da torre, se } U_x \leq 0,6 \\ \text{Meio do vão, se } U_x > 0,6 \end{cases} \quad (2)$$

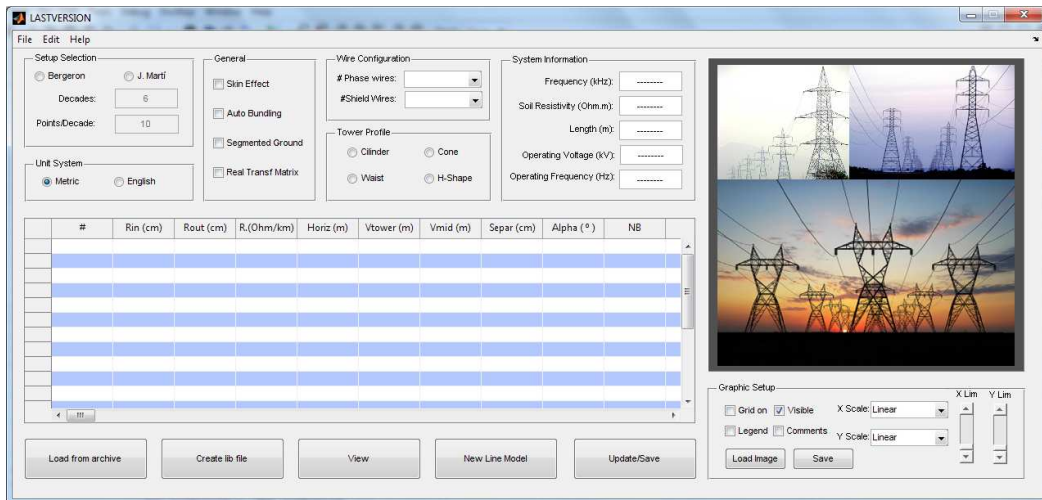


FIGURA 1 - Configuração básica do sistema e seleção de modelos.

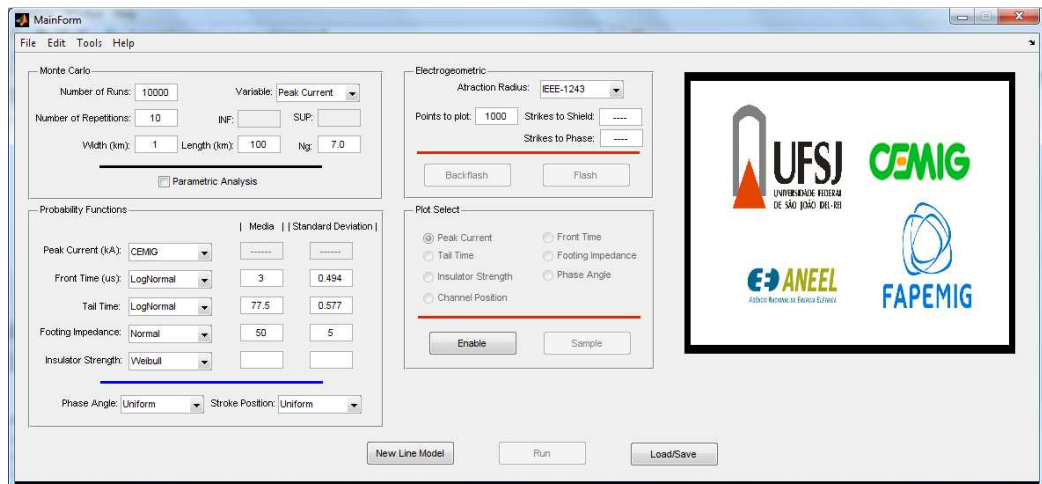


FIGURA 2 - Ajustes para a simulação Monte Carlo e para o MEG.

Tabela 1 – Caracterização estatística dos parâmetros considerados na simulação Monte Carlo.

Variável	Distribuição de Probabilidades
Pico de Corrente	Log-Normal
Taxa de crescimento	Log-Normal
Tempo de Frente	Log-Normal
Tempo de cauda	Log-Normal
Posição	Uniforme
Ângulo de referência	Uniforme
Impedância de Aterramento	Normal
Pico de Corrente	Log-Normal
Taxa de crescimento	Log-Normal
Tempo de Frente	Log-Normal

3.0 - RESULTADOS

3.1 Definição do Caso Base

A Figura 4 mostra a silhueta das torres da linha de transmissão definida como caso base: sistema trifásico, nível de tensão entre fases de 138 kV e vãos típicos de 400 m. As torres apresentam altura útil de 16 m, altura máxima de 24,47 m e base em forma de quadrado com 36 m² de área. Esta estrutura suporta três cabos fase (CAA *Linnet*) e um cabo para-raios (aço 3/8" HS). As cadeias de isoladores são compostas por nove isoladores padrão (espaçamento entre as ferragens de 1,314 m – 9 x 0,146 m). O aterramento elétrico é composto por quatro cabos contrapesos cada um com comprimento de 30 m, enterrados a meio metro de profundidade.

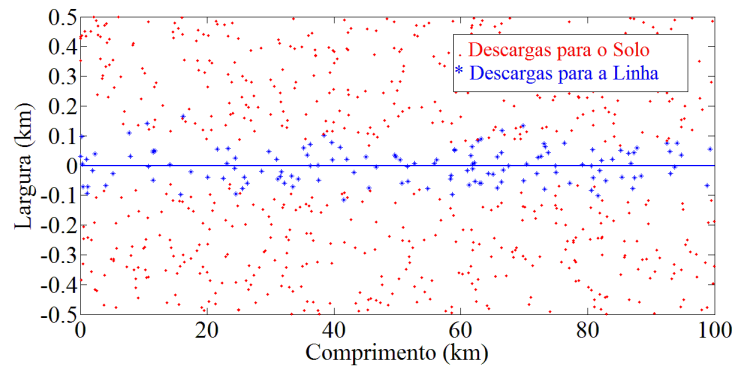


FIGURA 3 - Aplicação do MEG na determinação dos pontos de impacto.

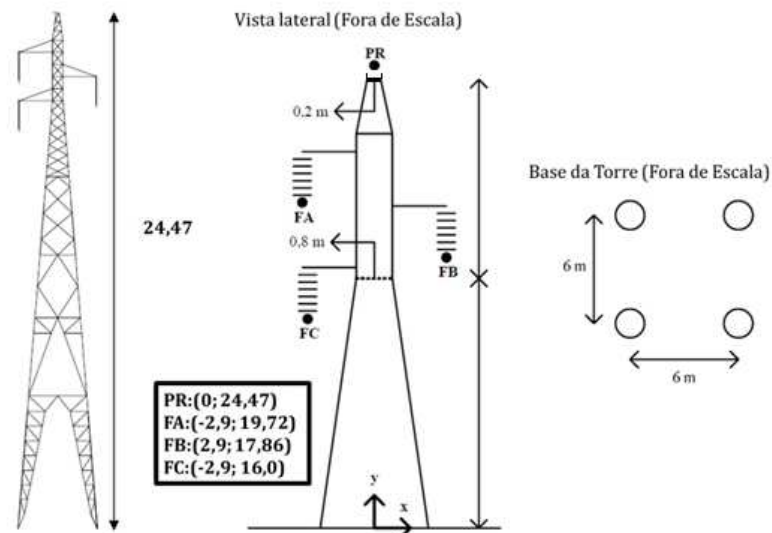


FIGURA 4 - Silhueta da torre analisada - PR é para-raios; FA, FB e FC são, respectivamente, fases A, B e C..

A atividade atmosférica na zona de estudo é determinada pela densidade de descargas (N_g). Este quantificador deve ser especificado para Minas Gerais, onde os sistemas da concessionária Cemig estão localizados: (14): $N_g = 7$ descargas/km²/ano (1). Para comparação com o programa *Flash*, é utilizada uma fonte de corrente do tipo rampa retangular: tempo de frente de 2 μ s e valor máximo de corrente (I_P) definido a partir da distribuição de probabilidade cumulativa e polaridade negativa (14). A característica tensão-tempo é utilizada como modelo padrão para representar as cadeias de isoladores (adotada no programa de referência, *Flash*).

3.1 Análises Paramétricas

3.1.1. ACAE-DLT versus *Flash*

Visando estabelecer um padrão para comparação, validação e correta interpretação dos dados obtidos, o caso base foi ajustado de modo a assemelhar-se às mesmas aproximações adotadas na metodologia empregada no programa *Flash*. Neste ajuste, apenas a posição do canal e o valor de pico de corrente assumem caráter estocástico e a taxa de *backflashover* é calculada após 2.000 iterações. O resultado para as condições estabelecidas para o caso base é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultado obtido pela aplicação do Método de Monte Carlo, considerando as premissas simplificadoras adotadas na versão 1.9 do programa *Flash* ($I_P/\text{Flash} = 31$ kA e $I_P/\text{MG} = 45$ kA), (1).

	ACAE-DLT		Flash/IEEE
	I_P/Flash	I_P/MG	I_P/Flash
<i>Backflashover</i> (Desligamentos/100km/ano)	37,59	81,37	37,30

A Figura 5 mostra a distribuição temporal da sobretensão na cadeia da fase C. Observa-se que, para os parâmetros do caso base, não se verifica a ocorrência de ruptura. No segundo caso é utilizada a curva de distribuição cumulativa do pico de corrente obtida para Minas Gerais (1). Nesta aproximação, os parâmetros do caso base implicam na ruptura do isolador, indicando que a taxa de desligamentos deve ser significativamente maior (Tabela 2). Conforme Figura 5, a ruptura ocorre em um instante muito próximo ao adotado no *Flash* (2 μ s). Simulações foram realizadas para avaliar a contribuição de cada uma das variáveis consideradas. Nestas, os parâmetros definidos como referência são sistematicamente modificados, atribuindo dispersão estatística à variável de interesse, com valor médio ajustado para o padrão adotado no *Flash*. Estes resultados são apresentados na Tabela 3. Verifica-se que, em geral, a consideração da distribuição estatística dos parâmetros de descarga resulta

na diminuição da estimativa da taxa de desligamentos. Isto é esperado, pois, neste caso, tais índices são obtidos em relação a solicitações menos severas. Por outro lado, a aleatoriedade do ângulo de referência no instante de incidência implica em um acréscimo de 2%. A consideração estatística dos parâmetros de descarga resulta em uma redução de 5% na taxa de desligamentos. A Tabela 3 apresenta também uma comparação entre dois modelos de cabos aéreos. Procurou-se manter as mesmas premissas simplificadoras do *Flash* para possibilitar melhor entendimento da sensibilidade da taxa de *backflashover*, com relação a cada uma das variáveis consideradas.

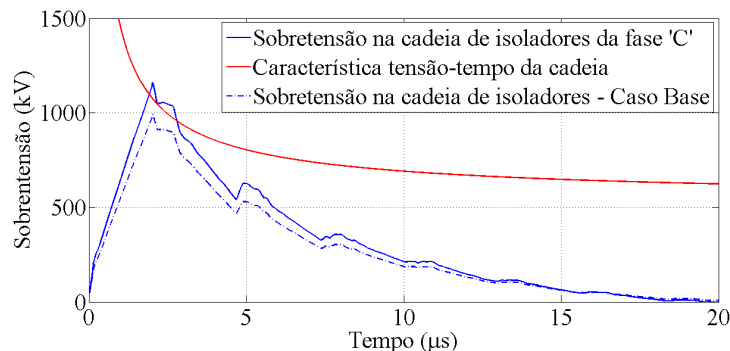


FIGURA 5 - Modelo padrão para disrupção das cadeias de isoladores.

Tabela 3 - Resultados obtidos pela aplicação do Método de Monte Carlo, considerando as premissas simplificadoras adotadas no *Flash* e atribuindo dispersão estatística às variáveis da simulação.

	ACAE-DLT	Desvio (%)	Flash
Tempo de Frente	35,56	5,40 ↓	37,30
Tempo de Cauda	35,89	4,52 ↓	
Impedância de Aterramento	35,91	4,46 ↓	
Ângulo de Referência da Tensão	38,60	2,67 ↑	
Todas as Variáveis/LT ¹	36,19	3,72 ↓	
Todas as Variáveis/LT ²	35,87	4,57 ↓	
LT ¹ : Parâmetros independentes da frequência.			
LT ² : Parâmetros variantes com a frequência – J. Martí.			

3.1.2. Cadeia de Isoladores

Além da característica tensão-tempo (modelo padrão para as simulações do caso base), foram implementadas duas outras abordagens para modelar o efeito disruptivo no isolamento de forma mais precisa. Na Figura 6a é mostrado o comportamento de uma das variáveis de controle do método de integração (19). Neste modelo, o processo de disrupção é iniciado quando a tensão dos isoladores excede determinado valor crítico (parâmetro inicial). Os parâmetros da equação do efeito disruptivo foram ajustados a partir da curva de suportabilidade tensão-tempo. Similarmente, quando se considera o método de progressão do *leader*, uma das variáveis de controle do processo que determina a evolução do canal de descarga no isolamento, é apresentada na Figura 6b. No modelo implementado, apenas as fases dos *streamers* e do *leader* foram consideradas, negligenciando o intervalo diferencial de formação do efeito corona. Os resultados para simulação utilizando os parâmetros do caso base são mostrados na Tabela 4. A avaliação destes índices sugere que o modelo adotado como referência, na representação das cadeias de isoladores, resulta em uma aproximação bastante conservadora. Comparativamente, considerando os resultados obtidos, por exemplo, na análise da dispersão estatística das variáveis e parâmetros do sistema, observa-se que a aplicação destas modelagens, cujos parâmetros também se apresentam com alguma incerteza, implica em média em desvios percentuais mais pronunciados que aqueles causados pela atribuição sistemática da característica estocástica das variáveis do modelo. A Tabela 5 mostra as estimativas obtidas, aplicando o Método de Monte Carlo às variáveis de interesse. Tal aproximação resulta em uma diminuição da taxa de desligamentos da linha em consonância com o comportamento já delineado.

É interessante avaliar o instante de ocorrência da disrupção. No *Flash* o teste de suportabilidade das cadeias é realizado em 2 e 6 μ s. Avaliando as características dos instantes de ruptura mostrados na Figura 7, ajustados para uma distribuição normal, percebe-se que o modelo de disrupção adotado como referência implica em um valor médio muito inferior ao considerado crítico no *Flash*. Por outro lado, os métodos de integração e de progressão do *leader* apresentam, em média, melhor concordância com este instante de ruptura. As curvas de probabilidade acumulada (Figura 8) mostram de forma mais clara estas divergências. Para o comprimento médio de vão considerado, as reflexões que chegam à torre monitorada são percebidas após 2,67 μ s. Tomando, por exemplo, o método de progressão do *leader*, a probabilidade de ocorrência de instantes de ruptura, iguais ou inferiores a este, é superior a 90 %. Conclui-se que a maior parte das disrupções acontece antes que as primeiras reflexões nas torres adjacentes possam sensibilizar os pontos de interesse. As diferenças entre o instante de disrupção e o tempo de frente, considerando a característica tensão-tempo, são menos pronunciadas quando se utiliza a onda de impulso (empregado no ensaio padronizado), para a qual esta característica é obtida. Neste caso, o valor médio dos instantes de ruptura resultantes $t_d \approx 1,04 \mu$ s, que corresponde a um desvio percentual muito menor que o encontrado nas simulações do caso base, com relação ao tempo de frente de onda fixado em 1,2 μ s.

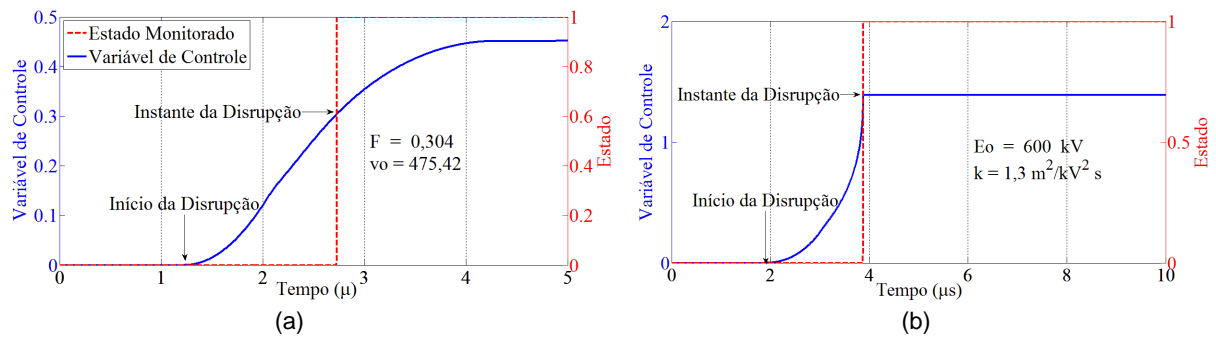


FIGURA 6 - Modelo de ruptura do isolamento baseado no método de: a) integração; b) progressão do leader.

Tabela 4 - Comparação entre os diferentes modelos de cadeias de isoladores, na avaliação do caso base.

	Rampa retangular – <i>Flash 1.9</i>		Impulso de Teste 1,2 X 50 μs	
	<i>Backflashover</i>	Desvio (%)	<i>Backflashover</i>	Desvio (%)
Curva Tensão-Tempo	37,59	0,00	37,79	0,53 ↑
Método de Integração	34,15	9,15 ↓	40,09	6,62 ↑
Progressão do <i>leader</i>	35,47	5,60 ↓	39,84	6,64 ↑

Tabela 5 - Resultados obtidos, considerando a dispersão estatística das variáveis do modelo.

	ACAE-DLT	Desvio (%)
Característica Tensão Tempo	36,19	3,72 ↓
Método de Integração	34,02	9,50 ↓
Progressão do <i>leader</i>	34,16	9,14 ↓

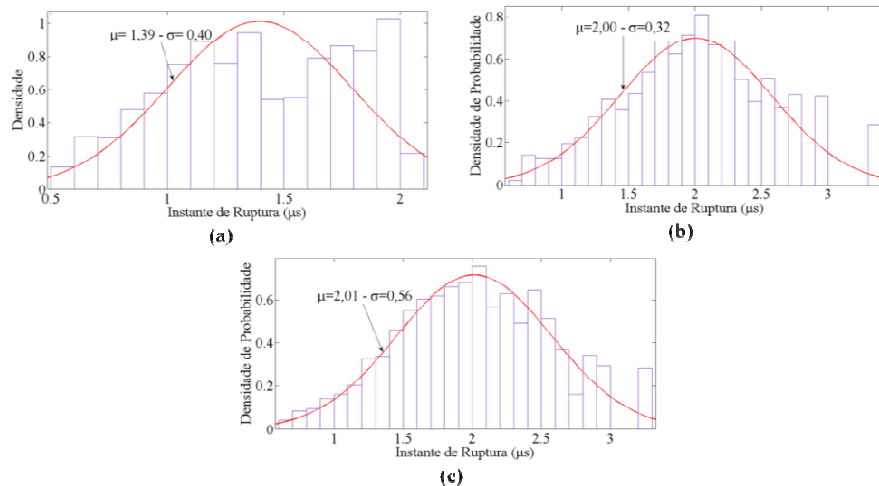


FIGURA 7 - Ocorrência da ruptura: (a) Tensão- tempo; (b) Método de Integração; (c) Progressão do *leader*.

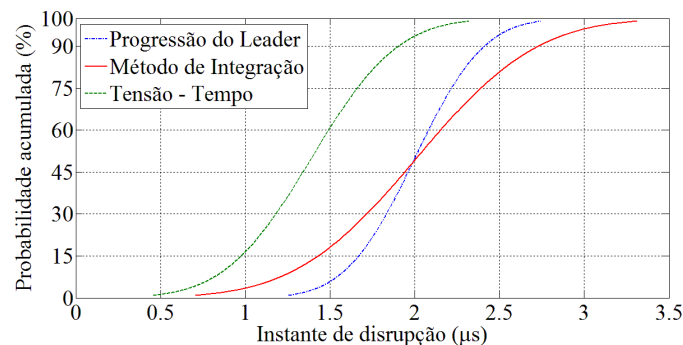


FIGURA 8 - Distribuição acumulada dos instantes de ocorrência de ruptura.

4.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo são apresentados alguns resultados obtidos com a aplicação do **ACAE-DLT**, considerando um perfil típico de distribuição pertencente à Cemig. A configuração base é estabelecida, definindo a estrutura de interesse, os parâmetros de incidência, a fonte de surto, o modelo de ruptura do isolamento e o aterramento elétrico. Os

parâmetros de entrada do algoritmo são ajustados para reproduzir as mesmas premissas e hipóteses simplificadoras adotadas no *Flash*. Em seguida, procede-se à verificação da influência da natureza estocástica das variáveis envolvidas nas estimativas de desempenho. Fixando parâmetros do caso base, é realizada uma série de avaliações de sensibilidade para determinar a influência das variáveis consideradas, como por exemplo, tempos de frente (t_f) e de cauda, impedância do aterramento, etc. no cálculo da taxa de *backflashover*. Finalmente, uma comparação entre três metodologias de representação dos processos disruptivos de cadeias de isoladores é apresentada, enfatizando as diferenças entre os modelos, tanto no cálculo do desempenho, como na distribuição estatística dos instantes de disrupção. Resultados adicionais, envolvendo análises de sensibilidade da taxa de desligamento em relação à tensão de ruptura, ao pico de corrente, ao comprimento da cadeia, à probabilidade de incidência no topo das torres, aos parâmetros de incidência geográfica, à Impedância Impulsiva de aterramento (Z_P), à impedância do canal, ao ângulo de referência, às diferentes versões do MEG, dentre outros, podem ser encontrados com detalhes em (14). De um modo geral, estes resultados ilustram que para: 1) Z_P de 10 a 100 Ω as estimativas de desligamento estimadas pelo *Flash* são consideravelmente menores que àquelas oriundas da aplicação de Monte Carlo, principalmente para valores maiores que 25 Ω ; 2) Z_P entre 15 e 40 Ω a disrupção na cadeia via curva tensão-tempo gera taxas de desligamento maiores que aquelas quando a cadeia é modelada pelo método de integração e pelo modelo de progressão do *leader*; 3) Z_P maior que 40 Ω as taxas são próximas, independente do modelo da cadeia; 4) t_f entre 0,1 e 15 μs as taxas são similares, independente do modelo da cadeia; 5) a consideração da função densidade de probabilidade lognormal para medições no Brasil (picos de até 45 kA) gera resultados de taxas de desligamento substancialmente maiores que aquelas que seriam geradas caso fossem consideradas as medições na Suíça – acima de 45 kA as estimativas são muito próximas. Os autores têm a expectativa de que tais resultados suscitem muitas discussões e pesquisas adicionais no tema de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Ademais, ilustram a importância de utilização de parâmetros de descargas atmosféricas medidas na região onde a linha está instalada e cuja taxa de desligamento deve ser estimada, além da importância da modelagem a ser considerada na descrição do comportamento físico do processo de disrupção da cadeia de isolador.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Schroeder, M. A. O. Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo. Tese de Doutorado – CPDEE/PPGEE/UFMG, 2001.
- (2) Visacro, S. Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia. São Paulo: Artiliber, 2005.
- (3) Zanetta Jr., L. C. Transitórios em Sistemas de Potência. São Paulo: Edusp-USP, 2003.
- (4) Leuven EMTP Centre. *Alternative Transients Program - Rule Book*, 1987.
- (5) Amon F., J. Curso Básico sobre a Utilização do ATP. CLAUÊ - Comitê de Usuários Latino-Americanos do ATP/EMTP, 1996.
- (6) Cigré - Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Co-ordination). Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. Cigre Technical Brochure 63, 1991.
- (7) IEEE TF on Fast Front Transients (A. Imece, Chairman). Modeling Guidelines for Fast Transients. IEEE Transactions on Power Delivery, January, Volume 11, 1996.
- (8) IEEE STD 1243 - 1997. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, 1997.
- (9) Hailiang, L., Xishan, W., Lei, L. and Xuefang, T. Automatic Simulation of Transmission Line Backflashover Rate Base on ATP. DRPT, 2008.
- (10) Soares, A., Schroeder, M. A. O. and Visacro, S. Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, 2005.
- (11) Visacro, S., 2007. A Comprehensive Approach to the Grounding Response of Lightning Currents. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, 2007.
- (12) Heidler, F. and Cvetic, J. M.. Calculation of Lightning Current Parameters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, 1999.
- (13) Dube, L. User's Guide to Model's in ATP: ATP EMTP User Group, 1996.
- (14) Mariano, J. A. S. Um Ambiente Computacional para Cálculos de Sobretensões Atmosféricas e Desempenho de Linhas de Transmissão Segundo uma Abordagem Estocástica. Dissertação de Mestrado, PPGEL/UFSJ/CEFET-MG, 2012.
- (15) Cotton, I. and Kadir, M. Z. A. A. A Randomised Leader Progression Model for Backflashover Studies. European Transactions of Electrical Power, 2008.
- (16) Braz, C. P. Avaliação do Comportamento de Isoladores de Distribuição de Média Tensão Frente a Impulsos Atmosféricos Não Normalizados. Tese de Doutorado, PPGEE/USP, 2001.
- (17) Caldwell, R. O. and Darveniza, M. Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non Standar Wave Shapes on the Impulse Strength of External Insulation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973.
- (18) Ancajima, A., Carrus, A., Cinieri, E. and Mazzeti, C. Optimal Selection of Disruptive Effect Models Parameters for the Reproduction of MV Insulators Volt Time Characteristics Under Standard and Non Standard Lightning Impulse. Power Tech, Lausanne Switzerland, 2007.
- (19) Kind, D. The Formative Area of Technical Electrode Configurations Under Impulse Voltage Stress. Elektrotechnische Zeitschrift, 1958.
- (20) Darveniza, M., Popolansky, F. and Whitehead, E. R.. Lightning Protection of UHV Transmission Lines. Electra, 1975.
- (21) Rahman M., Gillespie J. A., Darveniza M. and Saha T. K. Transmission Line Performance Against Lightning Investigated Using FLASH 1.81. IEEE, 1-7, 2007.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e à Companhia Energética de Minas Gerais-Distribuição S/A (Cemig-D) pelo apoio financeiro concedido para a realização da pesquisa apresentada neste artigo.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marco Aurélio de Oliveria Schroeder: possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP) e Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É professor associado do DEPEL/UFSJ e trabalha nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Aterramentos Elétricos e Descargas Atmosféricas.

José Antônio de Souza Mariano: possui Graduação e Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFSJ. É Engenheiro Eletricista da EMBRAER e trabalha na área de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas.

Warley de Sousa Sales: possui Graduação pela UFSJ e Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). É professor adjunto do DEPEL/UFSJ e trabalha nas seguintes áreas: Confiabilidade e Planejamento de Sistemas de Transmissão.

Luiz Carlos do Nascimento: possui Graduação pela Universidade Estadual de São Paulo (UNESP) e Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela UNIFEI. É professor adjunto DEPEL/UFSJ e trabalha nas seguintes áreas: Confiabilidade e Planejamento de Sistemas de Distribuição.

Sandro de Castro Assis: possui Graduação e Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFMG. Atualmente, é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFMG e é Engenheiro Eletricista de Projetos de Sistemas Elétricos de Linhas de Transmissão e Subestações da Cemig Distribuição.