



**GRUPO X – GDS**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**DESEMPENHO DE LINHA DE ALTA TENSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ESTUDO DE CASO DE UMA LINHA DE 69 KV DA ENERGISA MINAS GERAIS**

**Marco Aurélio de Oliveira Schroeder (\*)**  
**Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura**

**Afonso César Tavares**  
**Manoel Augusto Monteiro Boya**  
**Marcos Vinícios Carvalho Neto**  
**Márcio Rodrigues de Oliveira**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEPEL**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI - UFSJ**

**ENERGISA MINAS GERAIS**  
**ENERGISA SOLUÇÕES**

**RESUMO**

A Energisa tem enfrentado problemas com desempenho de suas linhas frente às descargas atmosféricas. Para o levantamento das causas e possíveis soluções foi estabelecido um projeto entre o GATCI/DEPEL/UFSJ e a Energisa. A equipe decidiu concentrar os estudos na linha de 69 kV (LDAT CTZ2 x MRE1). Foram definidas as seguintes atividades: i) levantamento das taxas de desempenho e ii) propostas de melhoria das taxas de desempenho mediante tratamento dos aterramentos. É apresentado ao longo do artigo um estudo de caso das avaliações das taxas de desempenho. Estas avaliações são realizadas segundo duas abordagens: i) determinística - programa *Flash/IEEE* e ii) estocástica, segundo o **ACAE-DLT**, desenvolvido pela equipe do GATCI/DEPEL/UFSJ. Os resultados são comparados com dados históricos. Os cálculos decorrentes do **ACAE-DLT** são muito próximos dos dados históricos, diferentemente dos resultados do *Flash*, o que ilustra a importância de ferramentas computacionais de caráter probabilístico-estatístico, em detrimento de abordagem determinística. São apresentadas reduções das resistências de pé de torre para melhoria do desempenho. Verifica-se significativa diminuição das taxas de desempenho após implementação das propostas citadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desempenho de Linhas de Alta Tensão, Sobreensões Atmosféricas, Abordagem Probabilístico-Estatística, Aterramento Elétrico de Pé de Torre, Comparação com Dados Históricos.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

De acordo com dados históricos disponíveis na literatura técnica, as descargas atmosféricas correspondem à principal causa dos desligamentos de energia elétrica, não programados, dos sistemas de transmissão (1)-(5). Segundo informações da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), os índices de tais desligamentos alcançam patamares de aproximadamente 70% (6), (7). As estatísticas internacionais são bastante próximas. Em (8), (9) são descritos que 65% dos desligamentos e 60% dos distúrbios no sistema elétrico são provocados por descargas atmosféricas. Ademais, apontam que as descargas atmosféricas são o principal mecanismo causador de curtos-circuitos fase-terra. O curto-circuito fase-terra é a falta com maior ocorrência no sistema elétrico. Em (8) são indicados também que: i) 60% dos desligamentos em sistemas com tensões nominais entre 100 e 250 kV são devidos aos curtos-circuitos fase-terra; ii) para linhas que operam com tensão nominal entre 100 e 150 kV, 75% dos curtos-circuitos fase-terra são provocados por descargas atmosféricas e iii) 67% das descargas atmosféricas geram um curto fase-terra. Em estudos realizados pela Cemig no início dos anos 2000, cerca de 70% dos curtos-circuitos no sistema elétrico são de natureza fase-terra.

Os preocupantes índices estatísticos citados acima motivam o desenvolvimento de pesquisas, realizadas nos mais diversos segmentos da sociedade (universidades, centros de pesquisa, concessionárias de energia etc.), com o objetivo de modelar a resposta do sistema de transmissão quando solicitados por correntes impulsivas típicas de descargas atmosféricas da região onde a linha de transmissão está instalada. Estas pesquisas incluem modelagens eletromagnéticas dos diversos elementos presentes na interação entre descargas atmosféricas e sistemas de transmissão, tais como: canal de descarga atmosférica; medições das ondas de corrente

(\*) Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Praça Frei Orlando, 170 – Centro – CEP: 36.307-352, Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL), São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil, e-mail: schroeder@ufsj.edu.br

características das descargas atmosféricas; quantificação do número de descargas atmosféricas que incidem em linhas de transmissão; comportamentos transitórios de cabos fase e para-raios, torres de transmissão e aterramentos elétricos; efeitos não lineares (corona na linha e ionização do solo no aterramento); efeito disruptivo nas cadeias de isoladores; para-raios de linhas etc. Neste sentido, existe um número muito grande de publicações nesta área. Naturalmente, tal situação inviabiliza a citação de todos estes trabalhos. Alguns documentos (normas, guias, brochuras etc.) congregam as principais modelagens em causa e apresentam metodologias para a determinação das taxas de desligamento das linhas de transmissão, como por exemplo, (1)-(4). Estas taxas são, basicamente, divididas em duas (1)-(4): i) desligamento por *backflashover* (*BFR*) e ii) desligamento por falha de blindagem (*SFFR*). O índice que quantifica o desempenho de uma determinada linha de transmissão corresponde à soma das duas taxas em questão, fornecido em “número de desligamentos por 100 km de linha por ano” (1)-(4).

A Energisa Minas Gerais tem, nos últimos anos, enfrentado diversos problemas associados ao desempenho de suas linhas de alta tensão frente às descargas atmosféricas. Para o levantamento das causas e possíveis soluções, recentemente (maio de 2016), foi estabelecido um projeto de cooperação técnica entre a Energisa Minas Gerais e o Grupo de Pesquisa denominado Grupo de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento (GATCI), cadastrado na base do CNPq, do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL), da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Este artigo tem justamente o objetivo de apresentar os resultados decorrentes do projeto de cooperação em causa, estando organizado da seguinte forma: após esta breve introdução, na seção 2 são descritas de forma sucinta as ferramentas computacionais utilizadas na pesquisa; na seção 3 são definidos os dados geométricos e elétricos da linha de alta tensão estudada; na seção 4 os resultados são apresentados e discutidos e, finalmente, na seção 5 encontram-se as principais conclusões extraídas do estudo.

## 2.0 - FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Um programa de cálculo de desempenho amplamente utilizado em universidades, centros de pesquisa e concessionárias de energia corresponde ao *Flash*. Esta ferramenta foi elaborada por um grupo de trabalho do IEEE (1), (3), (4), (10)-(12). Este programa possui uma série de aproximações, dentre as quais destaca-se a consideração de valores medianos para caracterização de grandezas de natureza estocástica, como por exemplo, o valor de pico da corrente de descarga atmosférica. Um estudo aprofundado do *Flash*, com destaque para suas características e principais limitações pode ser encontrado na referência (13).

Contudo, 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, os pesquisadores do GATCI desenvolveram e implantaram um ambiente computacional que proporciona, 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. A consequente ferramenta computacional desenvolvida foi denominada Ambiente Computacional segundo uma Abordagem Estocástica para cálculo de Desempenho de Linhas de Transmissão, ou apenas **ACAE-DLT**, que combina as vantagens do ambiente de computação científica *Matlab*<sup>®</sup> 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. Detalhes adicionais do **ACAE-DLT** podem ser acessados nas referências (14)-(17). Vale destacar a seguinte postura na confecção do **ACAE-DLT**: proporcionar uma ferramenta que seja utilizada por empresas e que não fique somente na universidade. Assim sendo, sempre que possível, simplificações de ordem prática foram realizadas (14)-(17), sempre mantendo uma postura conservadora.

## 3.0 - DESCRIÇÃO DA LINHA DE ALTA TENSÃO DA ENERGISA MINAS GERAIS

A equipe da Energisa envolvida no projeto solicitou que os estudos iniciais fossem concentrados em uma linha de alta tensão de 69 kV, de circuito simples, denominada “LDAT CTZ2 x MRE1 69 kV”, que interliga as cidades de Cataguases e Muriaé (ambas situadas no estado de Minas Gerais). Tal definição foi motivada, essencialmente, pelo caráter de importância da linha “LDAT CTZ2 x MRE1 69 kV”, dado que da mesma existem derivações para outras linhas que alimentam as cidades de Mirai e Laranjal. Adicionalmente, foram estabelecidas as seguintes principais atividades norteadoras: i) levantamento detalhado das taxas de desempenho da linha de 69 kV supracitada e ii) propostas de melhoria das taxas de desempenho desta linha mediante tratamento dos aterramentos elétricos com vistas à diminuição dos valores das resistências de pé de torre (com o objetivo de consequente redução de suas impedâncias impulsivas).

A Figura 1 ilustra as configurações geométricas da silhueta típica da torre. Na Tabela 1 estão apresentados seus principais parâmetros geométricos e elétricos. Trata-se de uma estrutura de madeira com tipo de suporte de código ET11. A Figura 2 esboça a configuração geométrica, e respectivas dimensões, do aterramento elétrico da torre ilustrada na Figura 1. Verifica-se, assim, que a faixa de passagem desta linha é de 25 m e que a distância horizontal da parcela do cabo contrapeso paralela à faixa de passagem é de 1 m. O comprimento típico do

contrapeso total é de 50 m. O ângulo de  $45^\circ$  é mantido em todas as configurações de aterramento da linha “LDAT CT22 x MRE1 69 kV”. A linha pontilhada na Figura 2 indica que, em algumas configurações, pode existir uma ligação elétrica (acoplamento condutivo) entre os condutores de descida (vide Figura 1), e em outras pode não existir tal ligação. Segundo informações disponibilizadas pela Energisa, os valores de resistências medidas são os seguintes (todos em ohms): 7,5; 10,9; 12,8; 16,6; 17,1; 22; 24,6; 26,6; 30,2; 30,8; 42,4; 44,7 e 54,1. As medições em questão referem-se a 14 (quatorze) estruturas, sendo que o valor de  $7,5 \Omega$  foi medido em 2 (duas) destas estruturas. Com estes valores de “resistências de pé de torre” é possível calcular o desvio padrão e o valor médio das medições, conforme apresentados na Tabela 2. Adicionalmente, é possível construir o histograma (frequência de ocorrência) das resistências medidas, cujo resultado é ilustrado na Figura 3.

A linha “LDAT CT22 x MRE1 69 kV” está inserida em terrenos de relevos variados (plano, ondulado e montanhoso). Contudo, tendo em vista a visita *in locu* realizada em parte de trechos considerados críticos em relação à incidência de descargas atmosféricas, pôde-se verificar que o terreno é tipicamente plano. A extensão desta linha é de 50 km e é composta por 187 (cento e oitenta e sete) estruturas e o vão médio entre estruturas é de 270 m. Suas cadeias de isoladores possuem tensão disruptiva de 60 kV e são dos seguintes tipos: i) ancoragem (6 discos, comprimento de 870 mm) e ii) suspensão (6 discos, comprimento de 725 mm). A linha possui um desempenho médio histórico de 25,33 desligamentos por 100 km de linha por ano. Ademais, está inserida em uma região que possui um índice de incidência de descargas atmosféricas igual a 8,45, ou seja,  $N_g = 8,45$  descargas atmosféricas por  $\text{km}^2$  por ano (18).

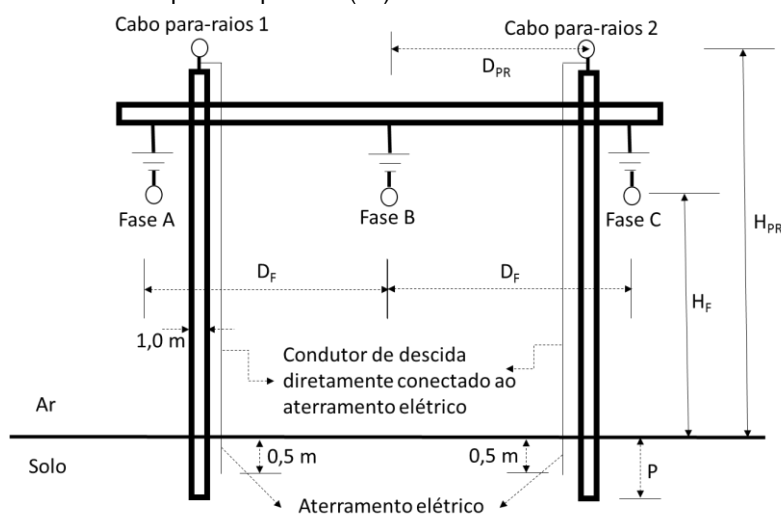


FIGURA 1 - Configuração geométrica da silhueta típica da torre.

TABELA 1 - Parâmetros geométricos e elétricos da silhueta típica da torre e da linha de alta tensão sob estudo.

Tensão de Operação	69 kV	Flecha dos condutores fase: $f_F$	7,0 m
Vão típico	270 m	Distância horizontal entre condutores fase: $D_F$	4,6 m
Número de condutores/fase	1	Distância horizontal entre condutor fase e cabo para-raios: $D_{PR}$	3,6 m
Número de cabos para-raios	2	Código do cabo para-raios	5/16"
Código dos condutores fase	Quail - 2/0	Altura do cabo para-raios: $H_{PR}$	13,80 m
Altura dos condutores fases (A, B e C): $H_F$	10,43 m	Flecha dos cabos para-raios: $f_{PR}$	4,0 m
		Profundidade - P	2,20 m

#### 4.0 - RESULTADOS E ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Com o intuito de ilustrar os resultados e respectivas sensibilidades das taxas de desempenho da linha da Energisa sob enfoque, o *Flash* (versão 1.9) e o **ACAE-DLT** assumem as seguintes configurações:

- *Flash* Monte Salvatore  $\Rightarrow$  utilização do *Flash* (11) com dados de correntes de descargas atmosféricas medidas no Monte San Salvatore (19), (20);
- *Flash* Morro do Cachimbo  $\Rightarrow$  utilização do *Flash* (11) com dados de correntes de descargas atmosféricas medidas no Morro do Cachimbo (5), (21);
- **ACAE-DLT** Monte Salvatore  $\Rightarrow$  utilização do **ACAE-DLT** (17) com dados de correntes de descargas atmosféricas medidas no Monte San Salvatore (19), (20);
- **ACAE-DLT** Morro do Cachimbo  $\Rightarrow$  utilização do **ACAE-DLT** (17) com dados de correntes de descargas atmosféricas medidas no Morro do Cachimbo (5), (21).

Vale destacar, também, que a sequência de análises de sensibilidade apresentadas nas próximas subseções seguem uma ordem com qualidade crescente dos resultados, no sentido de maior proximidade dos valores estimados (**ACAE-DLT** e *Flash*) das taxas de desempenho quando comparados com os dados históricos e com utilização de medições de descargas atmosféricas (e respectivas ondas de corrente) típicas da região onde a linha está inserida.

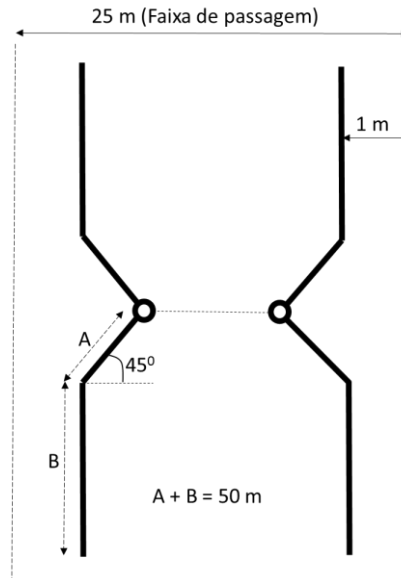


FIGURA 2 - Configuração geométrica do aterramento elétrico.

TABELA 2 - Resistências medidas, desvio padrão e valor médio.

Valores medidos de resistência de pé de torre ( $\Omega$ )	7,5; 7,5, 10,9; 12,8; 16,6; 17,1; 22; 24,6; 26,6; 30,2; 30,8; 42,4; 44,7 e 54,1
Média ( $\Omega$ )	24,84
Desvio padrão ( $\Omega$ )	14,4191

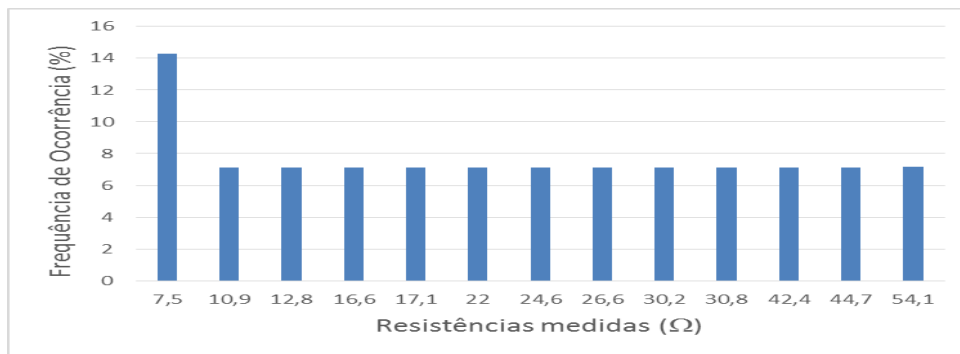


FIGURA 3 - Histograma (frequência de ocorrência) das resistências medidas.

#### 4.1. Análise Paramétrica I – Sensibilidade em Relação aos Dados de Medição do Monte San Salvatore e aos do Morro do Cachimbo:

Na Tabela 3 estão ilustrados os resultados gerados pelo **ACAE-DLT** (Monte San Salvatore e Morro do Cachimbo), pelo *Flash*/versão 1.9 (Monte San Salvatore e Morro do Cachimbo) e pelos dados históricos de desempenho fornecidos pela Energisa. Por “Monte San Salvatore” deve estar subentendido o valor mediano do pico de corrente igual a 31 kA e por “Morro do Cachimbo” o valor mediano de 45 kA (5), (19)-(21). O aterramento é representado pelo histograma das resistências medidas (Figura 3), o terreno onde a linha de alta tensão está inserida é considerado plano e o processo de interrupção elétrica na cadeia de isoladores é modelado por meio da curva tensão *versus* tempo (16), (22).

Os resultados ilustrados na Tabela 3 traduzem importantes conclusões. À primeira vista pode parecer que os resultados gerados pelo **ACAE-DLT** (30,73) e *Flash* (33,65), considerando dados de medição do Monte San Salvatore, são mais confiáveis, uma vez que se aproximam mais dos dados históricos (25,33), principalmente o resultado associado ao **ACAE-DLT** (30,73). Todavia, tal raciocínio é precipitado, pois os dados medidos em San Salvatore não correspondem às descargas atmosféricas típicas do ambiente brasileiro. Desta forma, a comparação correta a ser realizada corresponde aos resultados gerados pelo **ACAE-DLT** e *Flash* segundo

dados de medição do Morro do Cachimbo. Neste sentido, percebe-se claramente que as taxas de desempenho estimadas pelo **ACAE-DLT** (38,27) são muito mais próximas dos índices históricos (25,33) do que as do *Flash* (50,30). Isto indica a importância fundamental de se considerar, nas análises de desempenho de linhas de alta tensão, valores de medição de parâmetros de descargas atmosféricas realizados em regiões próximas aos trechos onde as linhas estão instaladas. Neste aspecto, para estudos de desempenho de linhas realizadas no Brasil é preferível a utilização dos dados medidos na Estação de Pesquisas de Descargas Atmosféricas do Morro do Cachimbo. Em decorrência, nas análises paramétricas que se seguem são usados somente dados de medição do Morro do Cachimbo e resultados oriundos da aplicação da ferramenta computacional **ACAE-DLT**, dada, respectivamente, a maior representatividade do fenômeno físico “descargas atmosféricas” e a proximidade mais estreita com os dados históricos de desempenho.

TABELA 3 - Sensibilidade das taxas de desempenho em relação aos dados de Medição do Monte San Salvatore e aos do Morro do Cachimbo.

	Taxas de Desempenho por 100 km de linha por ano				Dados Históricos
	Flash – versão 1.9		ACAE-DLT		
	Monte San Salvatore	Morro do Cachimbo	Monte San Salvatore	Morro do Cachimbo	
<i>Flashover</i>	3,13	0,67	3,13	0,67	---
<i>Backflashover</i>	30,52	49,63	27,60	37,60	---
Total	<b>33,65</b>	<b>50,30</b>	<b>30,73</b>	<b>38,27</b>	<b>25,33</b>

#### 4.2. Análise Paramétrica II – Sensibilidade em Relação ao Perfil do Terreno:

Na Tabela 4 estão ilustrados os resultados gerados pelo **ACAE-DLT** considerando terrenos plano, ondulado e montanhoso, e pelos dados históricos de desempenho. Todos os outros parâmetros são aqueles definidos na subseção 4.1. Destes resultados conclui-se o que foi devidamente observado na visita *in locu* realizada em trechos críticos da “LDAT CT22 x MRE1 69 kV”, qual seja: a predominância de terreno plano. Os resultados ilustram justamente tal verificação, dado que as taxas de desempenho geradas pelas considerações de terrenos ondulado (43,26) e montanhoso (65,36) são consideravelmente superiores à média histórica (25,33). Por conseguinte, nas próximas análises paramétricas, somente o perfil de terreno plano é considerado.

TABELA 4 - Sensibilidade das taxas de desempenho em relação ao perfil do terreno onde a linha de alta tensão está instalada.

	Taxas de Desempenho por 100 km de linha por ano			Dados Históricos
	ACAE-DLT (Morro do Cachimbo)			
	Terreno Plano	Terreno Ondulado	Terreno Montanhoso	
<i>Flashover</i>	0,67	0,67	0,67	---
<i>Backflashover</i>	37,60	42,59	64,69	---
Total	<b>38,27</b>	<b>43,26</b>	<b>65,36</b>	<b>25,33</b>

#### 4.3. Análise Paramétrica III – Sensibilidade em Relação às Resistências de Pé de Torre:

Na Tabela 5 estão ilustrados os resultados gerados pelo **ACAE-DLT** considerando as resistências medidas, cujo histograma da Figura 3 é representado por distribuições de probabilidades cumulativas dos tipos log-normal e normal (10), (16), (22). Todos os outros parâmetros são aqueles definidos na subseção 4.1. Os resultados apresentados na Tabela 5 colaboram para elucidar uma questão amplamente discutida na literatura, qual seja: a distribuição estatística mais realista para a representação das resistências de aterramento de pés de torre de linhas de alta tensão é a distribuição de probabilidade cumulativa normal, em detrimento da log-normal. Tal conclusão é embasada pela taxa oriunda da primeira (38,27) muito mais próxima da média histórica (25,33) quando comparada com a associada à segunda (42,27). Desta forma, verifica-se que a distribuição normal é a que melhor representa o histograma das frequências de ocorrências das resistências de pé de torre medidas.

TABELA 5 - Sensibilidade das taxas de desempenho em relação à representação do sistema de aterramento elétrico da linha de alta tensão.

	Taxas de Desempenho por 100 km de linha por ano		Dados Históricos
	ACAE-DLT (Morro do Cachimbo e terreno plano)		
	Normal	Log-Normal	
<i>Flashover</i>	0,67	0,67	---
<i>Backflashover</i>	37,60	41,60	---
Total	<b>38,27</b>	<b>42,27</b>	<b>25,33</b>

#### 4.4. Análise Paramétrica IV – Sensibilidade em Relação à Modelagem da Cadeia de Isoladores e ao Modelo do Aterramento Elétrico:

Nas Tabelas 6 a 8 estão ilustrados os resultados gerados pelo **ACAE-DLT** considerando os processos de disrupção elétrica na cadeia de isoladores modelados mediante, respectivamente, a curva tensão *versus* tempo, o método de integração e a progressão do líder (16), (22). Nestas tabelas considera-se, para cada modelo da

cadeia de isoladores, as representações da resistência de pé de torre descritos na subseção anterior. Todos os outros parâmetros são aqueles definidos na subseção 4.1.

As taxas de desempenho ilustradas nesta subseção esboçam uma conclusão semelhante à que é difundida na literatura: o modelo mais fisicamente consistente para traduzir o processo de ruptura elétrica nas cadeias de isoladores é o “método de integração”. Observa-se a grande proximidade da taxa de desempenho estimada pelo **ACAE-DLT** quando da consideração de terreno plano, distribuição normal para as resistências de aterramento e método de integração para as cadeias de isoladores (29,95) em relação à média histórica (25,33).

TABELA 6 - Sensibilidade das taxas de desempenho em relação à curva tensão versus tempo para cada representação do sistema de aterramento elétrico da linha de alta tensão.

	Taxas de Desempenho por 100 km de linha por ano		
	ACAE-DLT (Morro do Cachimbo, terreno plano e curva tensão <i>versus</i> tempo)		Dados Históricos
	Normal	Log-Normal	
<i>Flashover</i>	0,67	0,67	---
<i>Backflashover</i>	37,60	41,60	---
Total	<b>38,27</b>	<b>42,27</b>	<b>25,33</b>

TABELA 7 - Sensibilidade das taxas de desempenho em relação ao método de integração para cada representação do sistema de aterramento elétrico da linha de alta tensão.

	Taxas de Desempenho por 100 km de linha por ano		
	ACAE-DLT (Morro do Cachimbo, terreno plano e método de integração)		Dados Históricos
	Normal	Log-Normal	
<i>Flashover</i>	0,67	0,67	---
<i>Backflashover</i>	29,28	39,07	---
Total	<b>29,95</b>	<b>39,74</b>	<b>25,33</b>

TABELA 8 - Sensibilidade das taxas de desempenho em relação à progressão do líder para cada representação do sistema de aterramento elétrico da linha de alta tensão.

	Taxas de Desempenho por 100 km de linha por ano		
	ACAE-DLT (Morro do Cachimbo, terreno plano e progressão do líder)		Dados Históricos
	Normal	Log-Normal	
<i>Flashover</i>	0,67	0,67	---
<i>Backflashover</i>	12,39	36,23	---
Total	<b>13,06</b>	<b>36,90</b>	<b>25,33</b>

#### 4.5. Análise Paramétrica V – Proposta de Melhoria dos Aterramentos Elétricos (Diminuição das Resistências de Pé-de-Torre):

Os excelentes resultados obtidos e relatados nas subseções 4.1 a 4.4 incentivaram a continuação do projeto de consultoria. A natural sequência impõe uma análise no sentido de diminuir as atuais elevadas taxas de desempenho da linha de alta tensão “LDAT CTZ2 x MRE1 69 kV”. Tendo em vista tal redução, a Energisa Minas Gerais iniciou uma série de ações práticas nesta linha. Uma destas ações refere-se a atuações nas resistências de pé de torre de algumas torres com vistas a minorar seus valores. Estas ações incluem medições de resistividades elétricas dos solos locais, com posterior estratificação do solo em 2 (duas) camadas e interligação dos cabos contrapesos (linha pontilhada na Figura 2) que constituem os aterramentos elétricos. Os resultados destes estudos foram devidamente disponibilizados pela Energisa e são apresentados a seguir nesta subseção. Os novos valores de resistência de pé de torre (calculados e ainda não medidos) são ilustrados na Tabela 9 e na Figura 4. Ao comparar a Figura 3 com a 4 e a Tabela 2 com a 9 percebe-se, naturalmente, uma significativa redução nos valores das resistências de pé de torre. Na média, a resistência diminui de 24,84  $\Omega$  (valor original) para 10  $\Omega$  (novo valor), enquanto o desvio padrão reduziu de 14,42  $\Omega$  (valor original) para 3,1  $\Omega$  (novo valor).

TABELA 9 - Resistências medidas, desvio padrão e valor médio (CONJUNTO NOVO).

Valores medidos de resistência de pé de torre ( $\Omega$ )	5; 5; 5; 9; 9; 10,1; 11; 11; 11; 11; 12,7; 12,7; 13,7; 13,7
Média ( $\Omega$ )	10
Desvio padrão ( $\Omega$ )	3,1

Nas análises de sensibilidade que se seguem o termo “CONJUNTO ORIGINAL” refere-se às resistências de pé de torre originalmente medidas, sem as melhorias citadas. Por outro lado, o termo “CONJUNTO NOVO” tem por objetivo se referir ao novo conjunto de valores de resistências de pé de torre correspondentes ao processo de melhoria do aterramento elétrico. Vale ressaltar que em todas as análises paramétricas realizadas nesta subseção são considerados: linha inserida em terreno plano; distribuição normal para as resistências de pé de

torre; processo de interrupção elétrica nas cadeias de isoladores representado pelo método de integração; modelo eletrogeométrico para a interação entre descargas e linhas; medições de ondas de correntes de descargas atmosféricas realizadas no Morro do Cachimbo. É oportuno comentar que os estudos apresentados nesta subseção têm como objetivo precípuo atingir um índice de desempenho máximo da linha supracitada igual a 5 desligamentos/100 km de linha/ano. Esta taxa, considerada aceitável, é preconizada pelas agências reguladoras. Adicionalmente, em alguns casos é aceitável índices de desligamento entre 5 e 10 desligamentos/100 km de linha/ano para linhas de alta tensão de 69 kV.

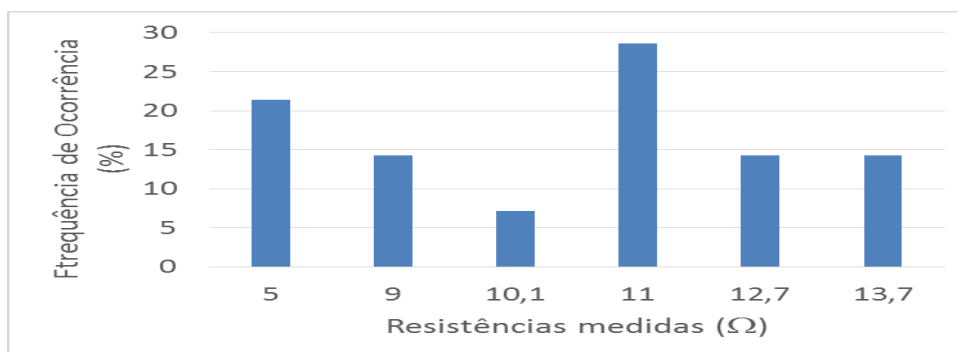


FIGURA 4 - Histograma (frequência de ocorrência) das resistências medidas (CONJUNTO NOVO).

A primeira análise (natural) corresponde à verificação do impacto da melhoria do sistema de aterramento nas taxas de desligamento da linha. A Tabela 10 ilustra os respectivos índices de desempenho considerando os CONJUNTOS ORIGINAL E NOVO das resistências de pé de torre. Em conformidade com os resultados apresentados na Tabela 10, pode-se verificar que:

- Como esperado, a taxa de falha de blindagem (*flashover*) não depende dos valores de resistências de pé de torre.
- Como esperado, a taxa de *backflashover* é extremamente sensível em relação às resistências de pé de torre.
- O aterramento elétrico é um elemento primordial no controle das taxas de desligamento por *backflashover* (normalmente maiores que as de falha de blindagem) de linhas de alta tensão. Com a melhoria (redução) das resistências de aterramento de pé de torre (de 24,84 Ω para 10 Ω na média – uma redução de aproximadamente 59,77 %, ou para 40,23 %) o número de desligamentos por 100 km de linha por ano, estimado pelo **ACAE-DLT**, devido a descargas atmosféricas, reduziu de 29,95 para 3,47. Em termos percentuais, esta significativa redução corresponde em torno de 88%.
- Para que a intensa diminuição na taxa de desempenho seja processada a Energisa deve garantir que os novos valores de resistência de pé de torre sejam efetivamente postos em prática. Observa-se a enorme melhoria de tais resistências. Uma diminuição em média de 59,77%. Em alguns casos, houve redução de 89 % (de 44,7 Ω para 5 Ω).
- Adicionalmente, para se garantir a redução dos índices de desempenho é necessário ter certeza de que as resistências das 14 (quatorze) estruturas disponibilizadas pela Energisa correspondam aos piores casos de resistências de todas as 187 (cento e oitenta e sete) estruturas que compõem a linha sob estudo neste projeto.

TABELA 10 - Impacto da melhoria do sistema de aterramento nas taxas de desempenho da linha de alta tensão "LDAT CTZ2 x MRE1 69 kV" –  $N_g = 8,45$  descargas/km<sup>2</sup>/ano, comprimento das cadeias de isoladores igual a 725 mm e vão médio de 270 m.

	Taxas de Desempenho por 100 km de linha por ano		
	ACAE-DLT (Morro do Cachimbo, terreno plano, distribuição normal, método de integração e modelo eletrogeométrico)		Dados Históricos
	CONJUNTO ORIGINAL	CONJUNTO NOVO	CONJUNTO ORIGINAL
<i>Flashover</i>	0,67	0,67	---
<i>Backflashover</i>	29,28	2,80	---
Total	<b>29,95</b>	<b>3,47</b>	<b>25,33</b>

## 5.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo são apresentados os principais resultados e respectivas análises de sensibilidade relativas ao projeto de cooperação técnica entre o GATCI/DEPEL/UFSJ e a Energisa. Os resultados e análises em causa envolvem basicamente os cálculos das taxas de desempenho, por falha de blindagem, por *backflashover* e total, da linha "LDAT CTZ2 x MRE1 69 kV" pertencente à Energisa Minas Gerais. Para levantamento destes resultados, 2 (duas) ferramentas computacionais são utilizadas, a saber: *Flash* (versão 1.9) e **ACAE-DLT**.

Nos cálculos são utilizados parâmetros reais de ondas de correntes características de descargas atmosféricas típicas da região sob enfoque, índice real de incidência de descargas atmosféricas (traduzido pelo número de descargas atmosféricas por km<sup>2</sup> por ano) nos trechos em que a linha de alta tensão está instalada, configurações geométricas e parâmetros elétricos reais da linha de alta tensão sob estudo, aterramentos elétricos típicos desta linha (representados por histogramas e distribuições cumulativas normal e log-normal das resistências medidas), modelagens confiáveis do processo de disrupção nas cadeias de isoladores etc. As taxas de desempenho estimadas que mais se aproximam dos dados históricos (disponibilizados pela Energisa) são oriundas da aplicação das seguintes modelagens/suposições: utilização do **ACAE-DLT** (em detrimento do *Flash/IEEE*) considerando que a linha está inserida em terreno plano, que os parâmetros típicos das ondas de correntes das descargas atmosféricas são os de medições realizadas na Estação de Pesquisas de Descargas Atmosféricas do Morro do Cachimbo, que a distribuição de probabilidade cumulativa das resistências de pé de torre é a normal e que o processo de disrupção nas cadeias de isoladores corresponde ao método de integração. Neste melhor caso percebe-se, evidentemente, que o **ACAE-DLT** gerou uma sobre estimativa da taxa de desempenho (resultado conservador) de, aproximadamente, 18,24% da taxa histórica ( $29,95/25,33 \approx 1,1824$ ). Vale salientar que, nas avaliações do **ACAE-DLT**, são desconsiderados os aspectos físicos relativos à ionização do solo e à variação dos parâmetros elétricos do solo (resistividade e permissividade) com a frequência. Estes fenômenos fazem com a impedância impulsiva do aterramento elétrico seja reduzido. Portanto, suas desconsiderações geram estimativas conservadoras para as taxas de desempenho. Logo, caso tais fenômenos sejam incluídos, a sobre estimativa gerada pelo **ACAE-DLT** é reduzida.

Para finalizar, destaca-se a melhoria proposta nos aterramentos elétricos da linha sob estudo. As reduções das resistências de pé de torre foram calculadas em função das alterações geométricas nos sistemas de aterramento e no processo de estratificação dos solos locais. Com tais melhorias, a taxa de desempenho estimada pelo **ACAE-DLT** reduz para 3,47 desligamentos/100 km de linha/ano, atendendo às exigências dos organismos reguladores.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE WG on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 104(4), 918–932, 1985.
- (2) CIGRE Working Group 33-01. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. Study Committee 33. Dallas, TX, USA, 1991
- (3) IEEE WG on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II — Updates to Analytical Models. IEEE Transactions on Power Delivery, 8(3), 1254–1267, 1993.
- (4) IEEE Std. 1243. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, 1997.
- (5) M.A.O. Schroeder. Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Moro do Cachimbo. Tese de Doutorado. CPDEE/PPGEE/UFGM, Belo Horizonte-MG, março de 2001.
- (6) L.C.L. Cherchiglia, A.C.G. Bezerra, R.L. Markiewicz, L.S. Carmo, A.M. Carvalho e G. E. S. Amorim. Otimização de Sistema Computacional para Estimativa do Desempenho de LT's Sob a Ação de Descargas Atmosféricas e sua Aplicação para Melhoria do Desempenho de LT's da CEMIG. VII Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ, Argentina, 1997.
- (7) A.M. Carvalho, M.S. Abreu, A. Cazetta, A.C. Carvalho, L.C.L. Cherchiglia, J.H. Diniz. Tecnologias para Análise e Melhoria do Desempenho de Instalações de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas. XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, 1999.
- (8) AIEE Committee Report. Report of Joint AIEE-EEI Subject Committee on Line Outages. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 71, no. 1, pp. , Jan. 1952.
- (9) J.G. Kappenman, D.L.V. House. Location Centered Mitigation of Lightning-Caused Disturbances. Minnesota Power, 1996.
- (10) W.A. Chisholm. The IEEE Flash Program: A Structure for Evaluation of Transmission Lightning Performance. T. IEE Japan. 8, Vols. 121-B, 2001.
- (11) Power Engineering Society, I. IEEE PES Lightning Performance of Overhead Lines Working Group: 15.09.08. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/lpd/> (22/03/2017).
- (12) 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.
- (13) C.G.C. Alvarez. Um Ambiente Computacional para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL), Associação Ampla entre UFSJ e CEFET-MG, 2011.
- (14) J.A.S. Mariano, M.A.O. Schroeder, L.C. Nascimento, W.S. Sales, S.C. Assis. Desenvolvimento de um Aplicativo para Estudos de Sensibilidade Paramétrica em Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas Utilizando uma Interface MATLAB-ATP. Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2012.



- (15) J.A.S. Mariano, M.A.O. Schroeder, L.C. Nascimento, W.S. Sales, S.C. Assis. A Software Application for Lightning Performance Assessment of Overhead Transmission Lines Using the Monte Carlo Method. Ground 2012 and 5<sup>th</sup> LPE, Bonito, 2012.
- (16) J.A.S. Mariano. 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.
- (17) M.A.O. Schroeder, J.A.S. Mariano, W.S. Sales, L.C. Nascimento, S.C. Assis. Ferramenta Computacional para Avaliação de Desempenho de Linhas de Transmissão Utilizando o Método de Monte Carlo. XXII SNPTEE, Brasília, 2013.
- (18) [http://www.inpe.br/webelat/ABNT\\_NBR5419\\_Ng/](http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng/)
- (19) K. Berger, R.B. Anderson and H. Kröninger. Parameters of Lightning Flashes. Electra, no 41, pp. 23-37, 1975.
- (20) R.B. Anderson and A.J. Eriksson. Lightning Parameters for Engineering Application. Electra, no 69, pp. 65-102, 1980.
- (21) S. Visacro, A. Soares, A., M.A.O. Schroeder, L.C.L. Cherchiglia and V.J. Sousa. Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station. Journal on geophysical research, Vol. 109, D01105, pp. 1-11, 2004.
- (22) A. Hileman, Insulation Coordination for Power Systems, pp. 627–640, Ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1999.

#### 7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INERGE (Instituto Nacional de Energia Elétrica), FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro concedido para a realização da pesquisa apresentada neste artigo.

#### 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Marco Aurélio de Oliveira Schroeder:** nasceu em Cataguases-MG, em 13 de novembro de 1968. Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP), 1991, e Mestrado (1996) e Doutorado (2001) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). É líder do Grupo de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento (GATCI), cadastrado na base do CNPq, e Coordenador do Laboratório Integrado de Pesquisas Eletromagnéticas (LAIPE) do DEPEL/UFSJ. Atua nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Aterramentos Elétricos, Descargas Atmosféricas, Técnicas de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento.



**Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura:** nasceu em 15 de março de 1990 em Pará de Minas-MG. É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) desde 2012. Em 2014 recebeu o título de mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica associação ampla entre UFSJ e CEFET-MG. Atualmente, é professor assistente da UFSJ e doutorando pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atua na área de transitórios eletromagnéticos causados por descargas atmosféricas em linhas de transmissão.



**Afonso César Tavares:** nasceu em Jacutinga-MG em 14 de dezembro de 1967. É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em julho de 1992. Concluiu os seguintes cursos de Pós-Graduação: Especialização em Sistema Elétrico de Potência pela UNIFEI e em Programa de Desenvolvimento Gerencial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV). Atualmente, cursa Especialização em Especialização em Pequenas Centrais Hidrelétricas pela UNIFEI. Atuou com Engenheiro na Energisa como coordenador de Gestão de Ativo e Estudos da Proteção da Distribuidora Energisa Minas Gerais. Atualmente, é Engenheiro da CPFL Renováveis, como Especialista de Manutenção Elétrica e Proteção em Linhas e Subestação da Geração dos Parques Eólicos e PCH's. Possui grande experiência em Gestão de Ativo, Estudos de Proteção no setor de Energia.