



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica  
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro  
Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

<b>Marcelo de Almeida Barbosa</b>
<b>Barbosa &amp; Andrade Engenharia e Serviços Ltda.</b>
marcelo.barbosa@barbosandrade.com.br

**Otimização Técnica-Econômica do Desempenho de LT 69 kV Frente às Descargas Atmosféricas:  
Metodologia, Melhorias e Resultados**

**Palavras-chave**

Avaliação  
Desempenho  
Linha de Transmissão

**Resumo**

Desligamentos em linhas de alta tensão podem ser causados por “flashovers” devido às falhas de blindagem, ou por “backflashovers”. Essas últimas representam diretamente o efeito da resistência de aterramento dos pés de torre sobre o desempenho da LT e é o objetivo deste trabalho.

Utilizando como exemplo a LT 69kV de um auto-produtor de energia, o trabalho apresenta uma metodologia para monitoramento do desempenho da linha, como auxílio ao pessoal de operação e manutenção.

Neste método, através de medições em campo das resistências de pé de torre e, considerando ainda, as correntes críticas de descargas e o nível cerâmico da região, determina-se as taxas de “backflashovers” e a localização e priorização dos pontos de maior sensibilidade a desligamentos.

No caso apresentado constatou-se a grande utilidade da metodologia e procedimentos utilizados por sua simplicidade para avaliação do desempenho da LT, que possibilita o planejamento antecipado de intervenções, compatibilizando os níveis aceitáveis de desligamentos com o investimento financeiro.

Adicionalmente o trabalho apresenta inovações na forma de medições de campo e medidas mitigadoras na restauração das resistências de pé de torre e melhorias no desempenho da LT, que resultaram na redução drástica na taxa de desligamentos.

**1. Introdução**

O quadro a seguir apresenta uma indicação das taxas de desligamentos normalmente esperadas e

consideradas aceitáveis para linhas de alta tensão sem religamento automático (4.1).

Características da LT	Nº de desligamentos/100 km.anos
Linhas rurais de 11-69 kV	3 a 7
Linhas de 138 kV em geral	0,6
Linhas muito importantes de 138 kV e extra alta tensão	0 a 0,3

Esses desligamentos podem ser causados por “flashovers” devido às falhas de blindagem ou por “backflashovers”. As primeiras dizem a respeito ao posicionamento do cabo para-raios na torre com relação ao ângulo de proteção adequado.

As taxas de desligamentos devido às falhas de blindagem são intrínsecas ao projeto e acabam se constituindo em valores de partida, sem possibilidade de gerenciamento. No entanto, se o projeto é adequado, as falhas de blindagem são mínimas, tornando as taxas de desligamento praticamente devidas aos “backflashovers”.

Como as falhas por “backflashovers” representam diretamente o efeito da resistência de aterramento dos pés de torre sobre o desempenho da LT, torna-se possível promover o gerenciamento da LT, definindo o melhor momento técnico-econômico de se intervir na restauração dos contrapesos de aterramento dos pés de torre.

A degradação natural ou proposital dos contrapesos ao longo do tempo afeta diretamente o desempenho da LT. O problema vivenciado pelo pessoal de operação e manutenção é definir, antecipadamente, através do monitoramento das resistências de pé de torre a probabilidade de crescimento da taxa de desligamentos e planejar os investimentos necessários.

Este trabalho apresenta como exemplo uma rotina desenvolvida para o acompanhamento do desempenho de uma LT, que devido à falta de controle preventivo, chegou a um nível elevado na taxa de desligamentos (21 desligamentos/100 km.anos), causando prejuízos e transtornos operacionais e, ainda, provocando um investimento emergencial do proprietário no reparo dos sistemas de aterramento que se apresentaram com um alto grau de deterioração e/ou mesmo inexistentes.

## 2. Desenvolvimento

A LT objeto deste trabalho pertence a um auto-produtor de energia e interliga a Usina Hidroelétrica de Brecha à sua planta industrial em Ouro Preto, Minas Gerais.

É uma linha de transmissão convencional na tensão de 69kV com 199 torres e comprimento de 66 km. O seu traçado de percurso foi feito sobre um perfil de relevo muito acidentado; de difícil acesso às estruturas; atravessando matas fechadas e, como complicador, as torres ficam implantadas em solos de alta resistividade sob uma região de nível cerâmico elevado.

Esta LT tem uma importância vital para a confiabilidade e continuidade operacional do processo industrial do auto-produtor. Assim, preocupados com o crescimento acelerado da taxa de desligamentos, medições de

campo e estudos foram realizadas para diagnóstico do problema, o que posteriormente, tornou-se um procedimento de rotina para monitoramento preventivo da LT, para evitar chegar-se a níveis elevados de degradação e custos elevados de reparação. O desenvolvimento do trabalho, a seguir, é baseado na LT citada.

## 2.1 Inspeções e Medições das Resistências de Pé de Torre

A resistência de aterramento de uma estrutura é composta pelas resistências em paralelo de todo o conjunto, ou seja, das grelhas ou fundações mais os cabos contrapesos.

O valor adequado para resistência de aterramento de uma torre de LT é a menor possível, porém, dependendo da resistividade do solo a questão econômica torna-se imperativa, devendo o analista avaliar o ponto ótimo entre o custo do sistema de aterramento versus o custo do aumento da taxa de desligamentos.

As medições das resistências de pé de torre devem ser feitas em todas as estruturas da LT e no caso em análise, totalizando 199 torres. Essas medições devem ser feitas com o cabo para-raios isolado da torre, o que é uma operação de alto risco com linha energizada.

Por outro lado, a medição com desconexão dos cabos contrapesos, além da dificuldade, acaba não considerando a contribuição importante para a resistência de aterramento referente às fundações (grelhas).

Uma inovação nas medições realizadas com sistema energizado foi a utilização de um megômetro de terra de alta frequência (25 kHz) que propicia a medição com cabo para-raios conectado. A injeção de uma corrente de medição em alta frequência torna a impedância indutiva do cabo para-raios razoavelmente alta, o que reduz o efeito das torres adjacentes. Além disso, o instrumento possui um módulo que permite a introdução automática de capacitâncias, com a finalidade de efetuar a compensação dos reativos presentes na medição. A metodologia de medição utilizada foi a convencional reduzida<sup>(4.3)</sup> e, após o traçado das curvas “sem e com” compensação de reativos, obtêm-se a resistência de aterramento pelo patamar da curva “com” compensação.

As medições foram executadas conforme FIGURA 1, de forma convencional, com as hastes em alinhamento perpendicular ao eixo longitudinal da LT e cravadas firmemente no solo numa profundidade mínima de 50 cm.

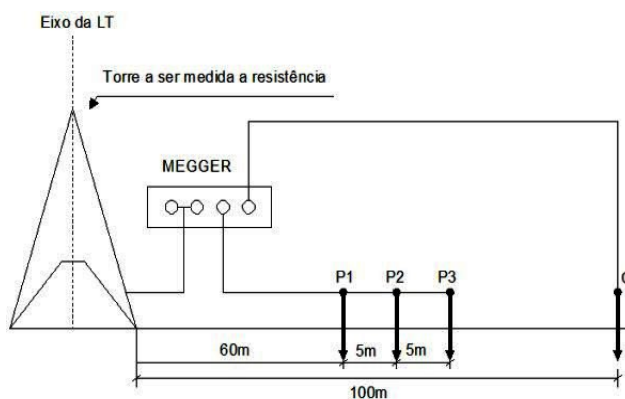


FIGURA 1 – Medição de resistência de pé de torre.

Para as medições em que o patamar de potencial não foi atingido foi necessário a repetição da medição, reposicionando a haste remota de corrente em uma posição mais distante (no caso, de 200 m) e alterando as hastes de potencial proporcionalmente.

Paralelamente às medições, foi realizada uma minuciosa inspeção nas condições físicas dos sistemas de aterramento.

A TABELA 1 mostra parte da planilha de medições e inspeções de campo:

TABELA 1- Planilha de medições e inspeções de campo

Nº da Torre	A ou S	Resistência de terra (Ohms)						Consistência	Observações
		P1	P2	P3	Média	Faixa			
		60m (120m)	65m (130m)	70m (140m)		mín	máx		
1	A	31,1	28,5	32,2	30,6	24,5	36,7	OK	Ninho fase C, isoladores.
10	S	49,0	44,2	48,3	47,2	37,7	56,6	OK	1 contrapeso quebrado; contrapesos expostos
17	A	23,8	25,8	27,4	25,7	20,5	30,8	OK	2 contrapesos quebrados, cadeia isolador queimada, isolador quebrado
42	S	47,5	54,1	50,1	50,6	40,5	60,7	OK	4 contrapesos soltos
92	S	76,7	79,4	85,4	80,5	64,4	96,6	OK	2 contrapesos soltos e corroídos; erosão nos pés da torre;
103	A	39,7	48,6	57,5	48,6	38,9	58,3	OK	Contrapesos inexistentes; corrosão no pé de torre.
199	A	6,05	6,7	6,92	6,6	5,2	7,9	OK	-

A partir dos resultados obtidos no campo, utilizou-se dos procedimentos seguintes para avaliação do desempenho da LT.

## 2.2 Metodologia

O método utilizado para estimar as taxas de “backflashovers” da LT Brecha - Saramenha foi o método do AIEE (4.2), utilizado para linhas blindadas operando abaixo de 230 kV.

As características da LT em avaliação estão apresentadas a seguir:

- Tensão nominal: 69 kV
- Comprimento: 66 km
- Número de torres: 199
- Média dos vãos: 348 m
- Altura média do cabo para-raios: 18,7 m
- Distância aproximada do condutor fase mais afastado: 8,0 m
- Cadeia de isoladores: 6 isoladores de disco 254x146 mm
- Comprimento de uma cadeia: ~ 1,0 m
- Nível cerâmico da região (TD): 100 dias de trovoadas/ano.

Os procedimentos de cálculos seguem os passos seguintes:

- Passo 1: Determinação do número efetivo de isoladores o qual representa o nível de

isolamento da linha.

Através da FIGURA 2 determina-se o fator de correção de acoplamento (0,975 no exemplo) e calcula-se o número efetivo de discos (5,85).

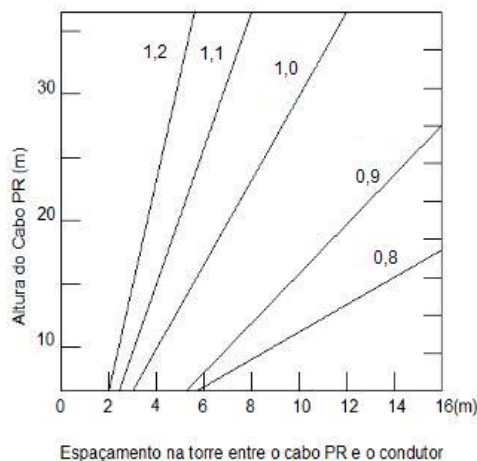


FIGURA 2 – Fator de correção para ajuste do número de isoladores

- Passo 2: Distribuição das resistências de pé de torre reduzidas para surto. Inicialmente os valores de resistências de pé de torre na frequência industrial (TABELA 1) são distribuídos conforme TABELA 2.

TABELA 2 – Distribuição das resistências (frequência industrial)

OHMS	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	>100
N° Torres	0	3	16	25	22	25	30	13	14	7	44
Frequência (%)	0	1,5	8,0	12,6	11,0	12,6	15	6,6	7,0	3,6	22,1

Os valores da TABELA 2 são, então, convertidos para valores reduzidos para surto com o auxílio da FIGURA 3 e o número de bandas restringidas para 6.

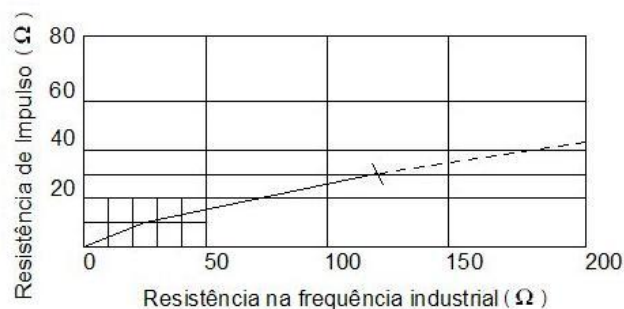


FIGURA 3 – Curva para estimação da resistência de surto (impulso)

Os novos valores e bandas estão mostrados na TABELA 3.

TABELA 3 – Resistências de surto e correntes críticas para descarga na torre

Identificação da banda	1	2	3	4	5	6
Ohms	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	>100
N° de Torres	3	41	47	43	21	44
Frequência (%)	1,5	20,6	23,6	21,6	10,6	22,1
Resistência de surto (ohms)	5	10	15	20	23	35
Corrente crítica $I_T^*$ (kA)	95	70	55	43	40	30
Taxa de flashovers na torre (TFR)	1,09	2,60	4,96	7,75	9,30	15,50

As correntes críticas para descargas na torre para cada banda de resistência são determinadas através de curvas elaboradas para TD=30, conforme FIGURA 4.

- Passo 3: Determinação da corrente crítica para descarga na torre  $I_T^*$  e taxas de flashovers na torre (TFR).

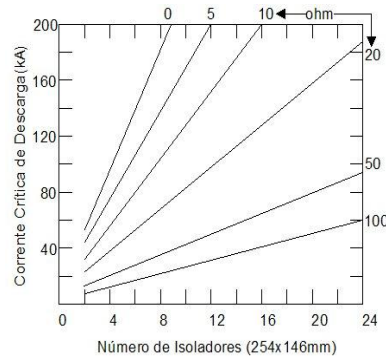


FIGURA 4 – Curvas para estimação das correntes críticas para a torre em função do número efetivo de isoladores e da resistência de pé de torre (valor de surto) (TD=30).

As taxas de flashovers são determinadas à partir da distribuição cumulativa da corrente de descarga e sua probabilidade de ocorrência (P) obtida da FIGURA 5 adiante e do número de descargas que caem na torre ( $N_1$ ), sendo dada pela equação:

$$N_1 = 62(TD) / 30 \text{ descargas} / 100 \text{ km.anos}$$

Para TD=30, então  $N_1 = 62$  e  $TFR = N_1 \cdot P$

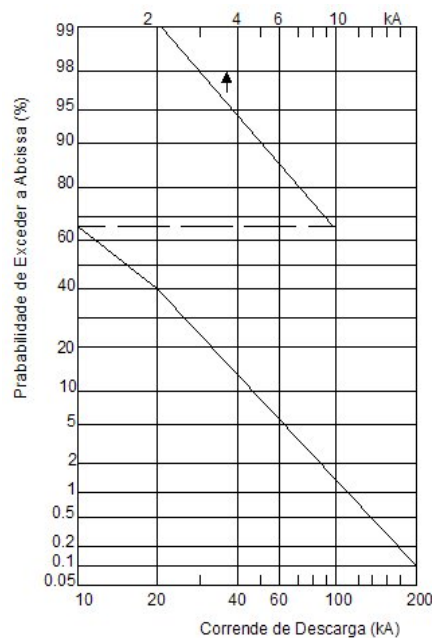


FIGURA 5 – Distribuições cumulativas das correntes de descargas atmosféricas

- Passo 4: Determinação da corrente de descarga crítica no meio do vão  $I_M^*$  e taxas de flashovers no meio do vão (MFR).

A distância média no meio do vão entre o cabo para-raios e o condutor fase mais próximo é de 4,0m. A corrente de descarga crítica no meio do vão  $I_M^* = 75\text{kA}$  obtida da FIGURA 6.

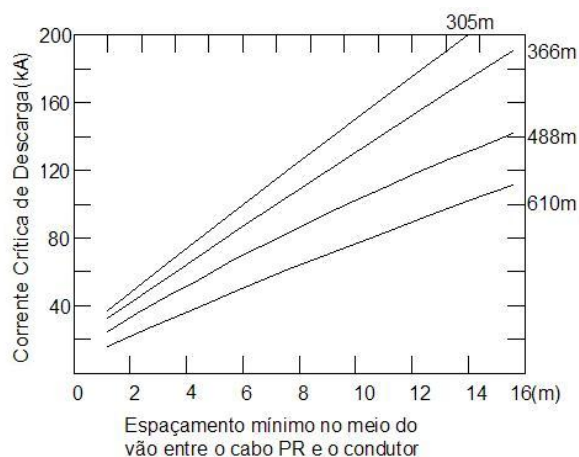


FIGURA 6 – Curvas para estimação da corrente crítica de descarga para o meio do vão em função da distância mínima entre o cabo para-raios e o condutor fase e o comprimento médio do vão (TD=30)

- Passo 5: Determinação da taxa de backflashovers da LT (BFO).

A taxa de backflashovers para a LT é a média ponderada das taxas de flashovers de cada banda, portanto:

$$BFO = 1/2(0,015.1,09 + 0,206.2,60 + 0,236.4,96 + 0,216.7,75 + 0,106.9,30 + 0,221.15,50) + 1/2.2,48 = 5,14$$

- Passo 6: Ajuste da BFO para o nível cerâmico TD=100.

$$BFO = 17,13 \text{ backflashovers}/100 \text{ km.anos.}$$

Sendo, aproximadamente:

- 13 desligamentos por flashovers na torre;
- 4 desligamentos por flashovers no meio do vão.

BFO é a taxa de desligamentos da LT por backflashovers em consequência da distribuição das resistências de pé de torre ao longo da linha.

### 3. Conclusões

#### 3.1- Taxa de desligamentos

A taxa de BFO encontrada mostrou o que a experiência operacional já estava constatando, ou seja, a LT Brecha-Saramenha apresentava um baixíssimo desempenho frente às descargas atmosféricas.

O número elevado de desligamentos, principalmente concentrados durante a estação chuvosa, onde as



descargas atmosféricas são mais frequentes, demonstram a degradação dos sistemas de aterramento dos pés de torre, inclusive sendo comprovado nas medições e inspeções de campo. A diferença entre a taxa real de 21 desligamentos/100 km.anos para a taxa estimada de 17 desligamentos/100 km.anos se deve, provavelmente, à falhas de blindagem e outras causas.

### **3.2- Posicionamento do cabo para-raios:**

Este trabalho objetivou verificar a influência do sistema de aterramento das torres no desempenho da LT. Não preocupou-se verificar a influência do posicionamento do cabo para-raios na torre pois as estruturas já são existentes e possivelmente nada se pode fazer sem substituição de estruturas, embora um afastamento do cabo para-raios em relação ao condutor fase no meio do vão seria muito benéfico para a BFO. Apenas para se ter uma idéia, a elevação do cabo para-raios em apenas 1,0 metro, além de melhorar a blindagem da LT e reduzir a taxa de desligamentos por falhas de blindagem, reduziria a taxa estimada de BFO em 2 desligamentos.

### **3.3- Resistências de pé de torre**

Considerando o máximo aceitável de 7 desligamentos/100km.anos e ainda a influência do posicionamento do cabo para-raios foi necessário e imperativo que as resistências de pé de torre da linha estivessem no máximo na banda 2 (TABELA 3). Poder-se-ia pensar na banda 1, mas, considerando as condições locais de acesso, disponibilidade de área e resistividade do solo e a relação custo-benefício, optou-se em adequar os sistemas de aterramento à banda 2.

Observa-se nas TABELAS 2 e 3 que apenas 44 torres estavam adequadas, havendo 155 torres de resistência elevada, sendo que destas, 108 torres apresentavam valores superiores a 60 ohms.

Foi, então, elaborado um plano de ação para reconstituição dos contrapesos de forma a se obter os valores máximos de resistência desejáveis.

As principais melhorias implantadas foram:

- substituição dos fios contrapesos de aço galvanizado por aço cobreado (copperweld), 30% de condutividade. Para redefinição do comprimento dos contrapesos foram realizadas amostragens de medições de resistividade do solo ao longo da linha;
- para as torres em que a resistência de aterramento permaneceu ainda elevada, a instalação dos contrapesos foi refeita usando um gel especial, ou foram projetados sistemas de aterramento específicos com a utilização inclusive de hastes prolongáveis;
- foram estabelecidos diversos esboços de ligação dos contrapesos para as diversas condições locais (normal; presença de obstáculo, terreno inclinado, etc.).

### **3.4- Para-raios**

Para minimizar também os desligamentos por flashovers na LT adotou-se, adicionalmente, a instalação de para-raios de óxido de zinco nas torres ao longo da linha<sup>(4.4)</sup>. Por questão de custo, escolheu-se apenas 8 torres, baseando-se na divisão de distância conjugada com a altitude relativa do local, retirado do perfil topográfico da LT.

### **3.5- Investimento e resultados**

O investimento realizado pelo auto-produtor chegou a cerca de U\$ 700 mil devido ao estado de degradação dos sistemas de aterramento. Com os resultados, conseguiu-se, nos últimos dois períodos chuvosos uma redução na taxa de desligamentos da ordem de 60%. A partir do trabalho realizado, foi implantada uma rotina de inspeção e medição anual para se determinar com antecedência o momento certo de se intervir

possibilitando o planejamento financeiro.

O uso do megômetro de alta frequência propiciou também o aumento na confiabilidade das medições e consequente aplicação da metodologia.

#### **4. Referências bibliográficas**

[4.1] DIESENDORF, W: Insulation Coordination in High-Voltage Electric Power Systems, chapter 5: “The Lightning Performance of Transmission Lines”.

[4.2] AIEE Committee Report, “A Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Line”, AIEE Transactions Pt. III, 69, 1187-1196.

[4.3] VISACRO, S. et alii: “Resultados da aplicação de metodologia inovadora para melhoria de desempenho da LT Guilman-Amorim-Ipatinga1, 230kV, frente a descargas atmosféricas”, XIX SNPTEE, Anais, GLT 21.

[4.4] BELTANI, J.M: “Medição de malha de terra em subestações energizadas”, UNESP – Ilha Solteira, capítulo 3, 33-38.

---