



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

**GLT 28
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ**

GRUPO III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

AVALIAÇÃO DA EFETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE CADEIAS DE ISOLADORES CONTRA ARCOS DE POTÊNCIA

**Darcy Ramalho de Mello * Eleilson Santos Costa Marcelo Guimarães Rodrigues
José Antonio D’Affonseca Cardoso Felipe José Giffoni da Silva**

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA

RESUMO

O arco de potência em uma cadeia de isoladores é um evento, com elevado conteúdo de energia, que se segue a uma descarga na cadeia. Para garantir proteção para uma cadeia de isoladores contra a ação destrutiva de um arco de potência, são utilizados diversos dispositivos cuja confiabilidade é verificada por meio de ensaios.

O conhecimento do desempenho das diversas configurações de proteção para cadeias de isoladores se constitui em uma ferramenta muito importante para o projeto de uma linha de transmissão. Com essa finalidade, decidiu-se montar um banco de dados com os resultados dos ensaios de arco de potência realizados nos laboratórios do CEPEL, no período de janeiro de 1984 a dezembro de 2006.

O presente artigo apresenta a análise dos dados inseridos de modo a se ter informação sobre o desempenho de cadeias, com e sem proteção, face aos diversos valores de corrente e tempo de aplicação utilizados em um ensaio, assim como uma avaliação dos danos sofridos pelos isoladores, ferragens, cabo e proteção.

PALAVRAS-CHAVE

Arco de Potência, Cadeia de Isoladores, Proteção, Banco de Dados

1.0 - INTRODUÇÃO

O arco de potência, em uma cadeia de isoladores, é um evento, com elevado conteúdo de energia, que se segue a uma descarga na cadeia. O canal ionizado formado pela descarga é percorrido por uma corrente de curto-circuito que pode ser da ordem de dezenas de kA, na situação mais favorável. O tempo de permanência do arco está relacionado com a atuação dos dispositivos de proteção (relés e disjuntores).

Um arco de potência pode ser causado:

- pela poluição na cadeia de isoladores, ao provocar uma descarga disruptiva com tensão normal de operação;
- por um surto de tensão, decorrente de manobras na linha de transmissão ou por uma descarga atmosférica;
- pelo deslocamento da cadeia de isoladores devido à ação do vento ao reduzir a distância de isolamento entre fases ou fase-terra.

No primeiro e segundo casos, o arco é mais perigoso por ser aderente à cadeia de isoladores, enquanto que no terceiro caso o arco ocorre entre condutores ou entre condutor e a torre, mas longe da cadeia. As principais conseqüências possíveis são:

- a queda do cabo da linha de transmissão com prejuízos incalculáveis;
- enfraquecimento mecânico e dielétrico da cadeia de isoladores, no local da falta, quando de baixa severidade, tornando-o um ponto vulnerável e provável de nova ocorrência.

Das várias forças que atuam durante o desenvolvimento de um arco de potência, as forças eletrodinâmicas são as de maior importância pois são provenientes da corrente de falha e dependem essencialmente da intensidade da corrente, da configuração geométrica do circuito e da posição da fase. Observa-se, também, a atuação de uma força de origem térmica, que se manifesta sobre toda a região do ar aquecido pelo arco de potência e tem um sentido sempre ascendente, e de forças exercidas pelo vento, que exercem pouco efeito sobre o comportamento do arco de potência.

A distribuição da força resultante sobre o arco pode ser considerada dividida em uma componente longitudinal, atuando na direção da linha, e uma componente transversal que age na direção normal à linha. A componente longitudinal é resultante da corrente de arco e das correntes que alimentam a cadeia pelos dois extremos opostos da linha. Tal componente tende a se anular quando a alimentação for simétrica e tem seu valor máximo quando os circuitos de alimentação forem totalmente assimétricos. A componente transversal da força eletrodinâmica, atuando na direção normal da linha de transmissão é proporcional à corrente de retorno que vai a terra através do corpo da estrutura da torre. No caso da supressão do cabo terra, a corrente de retorno é igual à corrente de curto circuito, sendo assim o caso mais crítico.

Diversos dispositivos são utilizados para garantir proteção para uma cadeia de isoladores contra a ação destrutiva de um arco de potência e para se entender melhor como atuam, deve-se conhecer, inicialmente, os eventos e os agentes que os provocam.

Devido à ausência na literatura de informações mais consistentes sobre a atuação da proteção contra arcos de potência, o CEPFL decidiu montar um banco de dados com os resultados dos ensaios realizados no período de 1985 a 2006 para que, através do cruzamento das informações, seja possível obter-se mais informações sobre o desempenho da proteção.

2.0 - CONDIÇÕES DE ALIMENTAÇÃO E RETORNO

Um exemplo da influência do arranjo nas forças eletrodinâmicas que atuam em um arco de potência pode ser visto a seguir e na Tabela 1 em uma configuração com fases horizontais.

- considerando-se uma alimentação simétrica, pode-se dizer que a componente da força longitudinal se anula visto que $I_{s1} = I_{s2}$, restando somente uma componente da força transversal. Na fase central face à simetria da janela da torre, a corrente de retorno se divide em duas partes iguais, anulando-se a componente de força transversal. Nas fases laterais a componente da força longitudinal se anula permanecendo as componentes da força transversal que atuam nas extremidades da cadeia.
- considerando-se uma alimentação assimétrica, no caso da fase central, ter-se-á somente a componente longitudinal no mesmo sentido da corrente agindo nas extremidades da cadeia e, para o caso das fases laterais, ter-se-á uma componente de força longitudinal e uma componente de força transversal, proveniente do circuito de retorno, atuando nas extremidades da cadeia.

Torna-se evidente que quando o arco permanece estável, próximo à cadeia de isoladores pela falta de uma força eletrodinâmica que o movimenta, devido à completa simetria do circuito, o dano na cadeia pode ser maior que no caso de um arco alimentado por uma corrente com muito maior intensidade, mas que se move rapidamente sob a ação de forças eletrodinâmicas produzidas pelas condições assimétricas do circuito. Portanto, em alguns casos, o uso de equipamentos de proteção é aconselhável, apesar de ele significar um gasto em torno de 35% do valor total do fornecimento de ferragens para cadeias de 460 kV e de 35% a 45% do valor total do fornecimento de ferragens para cadeias de 138 kV [1].

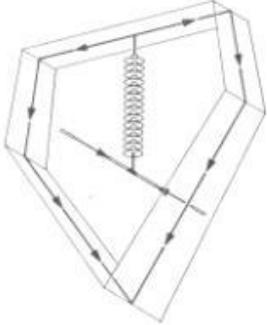
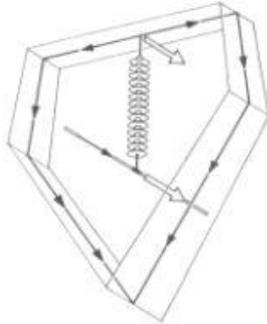
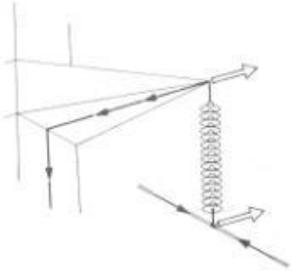
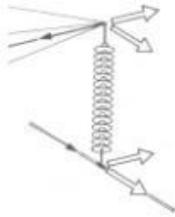
Retorno	Alimentação	
	Simétrica	Assimétrica
Simétrico		
Assimétrico		

Tabela 1 – Condições de alimentação e retorno

onde:  indica a direção da corrente  indica a direção da força

3.0 - O ENSAIO DE ARCO DE POTÊNCIA

Os danos produzidos por um arco de potência estão relacionados com a energia dissipada durante o evento. Portanto, um ensaio deve ser executado com um valor de corrente constante, que produza uma determinada energia, com uma duração semelhante à verificada em um caso real, que se deseja simular.

Para simular o desempenho da proteção, D. Fernandes, D.J. Loble, L. J. Pinto e C Marques sugeriram a execução de um ensaio com a seguinte seqüência de aplicações que foram utilizadas no sistema de Itaipu [2]:

- a primeira aplicação representa um defeito inicial que foi isolado corretamente;
- a segunda aplicação representa um religamento automático, sem sucesso, com o defeito aplicado na mesma cadeia de isoladores;
- a terceira aplicação simula uma segunda tentativa de religamento, desta vez manual.

Os defeitos de longa duração (na ordem de 200 a 500 milissegundos) resultam de falhas da proteção ou dos disjuntores, que assim não isolam normalmente o defeito, sendo necessário que o sistema de proteção de retaguarda dê início a um desligamento controlado em cascata, para isolar o defeito. Este ensaio somente precisa ser executado uma vez, tendo em vista a baixa probabilidade de ocorrer um segundo defeito com as mesmas características.

A NBR IEC-TR 61467 [3], com o objetivo de normalizar a execução do ensaio, indica que a quantidade de ensaios e sua duração são escolhidas para representar as condições que aparecem na maior parte dos sistemas e os resume na Tabela 2, mas admite que se valores diferentes forem exigidos para representar uma malha de características específicas, a quantidade de ensaios e sua duração podem ser determinadas mediante prévio acordo comercial.

Num ensaio de arco de potência, os principais pontos a serem levados em consideração são:

- as condições de alimentação e retorno da corrente;
- o comprimento da cadeia de isoladores;
- o valor da corrente a ser aplicada, sua forma de onda, seu grau de assimetria (função do fator de potência da rede);
- o disparo do arco;
- o número de aplicações a serem realizadas;
- duração do ensaio;
- a simulação do peso da linha sobre a cadeia;
- a existência ou não de vento;
- o tipo de fixação da cadeia à torre e as ferragens utilizadas para proteção;
- verificação dos componentes da cadeia após o arco.

Tabela 2 – Seqüência de ensaios normalizada

Circuito de retorno	Circuito de alimentação	Corrente de curto-circuito	Quantidade e duração dos ensaios (seqüência de ensaios)
Simétrico	Simétrica	$I_n = 0,2 I_{sys}$	Duas com $t_n = 0,2$ s e uma com $t_n = 1$ s
	Simétrica	$I_n = 0,5 I_{sys}$	Duas com $t_n = 0,2$ s e uma com $t_n = 1$ s
	Assimétrica	$I_n = I_{sys}$	Duas com $t_n = 0,2$ s e uma com $t_n = 0,5$ s
Assimétrico	Simétrica	$I_n = 0,2 I_{sys}$	Duas com $t_n = 0,2$ s e uma com $t_n = 1$ s
	Simétrica	$I_n = 0,5 I_{sys}$	Duas com $t_n = 0,2$ s e uma com $t_n = 1$ s
	Assimétrica	$I_n = I_{sys}$	Duas com $t_n = 0,2$ s e uma com $t_n = 0,5$ s

onde:

I_n – indica o valor da corrente a ser utilizada no ensaio

I_{sys} – Indica ao valor da corrente de curto-circuito da linha

4.0 - PROTEÇÃO CONTRA DANOS POR ARCO DE POTÊNCIA

A integridade de uma cadeia de isoladores, quando submetida a um arco de potência, depende da eficiência de sua proteção. Um dispositivo de proteção bem projetado permite sua substituição de uma maneira rápida e simples. A perda da eficácia de um dispositivo de proteção somente pode ser avaliada através da repetição, sobre o mesmo dispositivo de proteção, de vários ensaios sucessivos. Malaguti [4] considera que um dispositivo de proteção pode ser considerado adequado se, após ser submetido a 3 ensaios sucessivos com a mesma corrente de arco e com um intervalo de tempo entre aplicações suficiente para que o item sob ensaio possa atingir uma temperatura próxima à temperatura ambiente, não houver dano nos isoladores, nas ferragens e nos condutores e os danos no dispositivo de proteção forem de pequena monta (pequenas erosões sem deformações), mas nada que altere sua eficiência e capacidade de proporcionar total proteção aos demais elementos da cadeia. Segundo Malaguti, a quantidade de aplicações pode ser justificada como o número mínimo para que se possa ter uma idéia do comportamento do dispositivo de proteção em um caso real sob uma condição bastante desfavorável.

Os dispositivos de proteção (anéis, raquetes, chifres, etc.) que estão instalados nas extremidades da cadeia, devem manter o arco o mais longe possível dela, apesar das raízes do arco (inferior e superior) estarem fixadas nas proteções.

A seção e a escolha dos materiais dos dispositivos de proteção merecem atenção especial, face à elevada temperatura produzida pelo arco e, dependendo do tempo de duração do mesmo, pode provocar deformações, perfurações além de falhas na galvanização. Para proteção do condutor é aconselhável o uso de hastes préformadas na região onde a cadeia de isoladores prende o condutor. Em ensaios realizados [1], observou-se que as raízes do arco tendem a se deslocar para as extremidades da raquete, com maior ou menor mobilidade, deslocando-se dos isoladores e fazendo com que o arco permaneça totalmente através do ar.

A efetividade da atuação de um sistema de proteção pode ser avaliada ao se comparar o tipo e quantidade de danos entre uma cadeia não protegida e uma cadeia protegida. Os seguintes danos devem ser avaliados:

- queda da cadeia com conseqüente queda do condutor;
- dano no condutor com rompimento de alguns fios;
- quebra de alguns isoladores mas sem queda do condutor;
- sinais de queima da superfície dos condutores;
- danos severos ao equipamento de proteção.

5.0 - DESCRIÇÃO DO BANCO DE DADOS

O banco de dados foi montado em Access e as planilhas de cada tipo de cadeia foram estruturadas de acordo com as suas características. A listagem com os tópicos das tabelas pode ser vista a seguir:

- ano do ensaio;
- tensão nominal;
- tipo de cabo;
- tipo de cadeia (simples, dupla, etc.);
- tipo de proteção;
- desenho (se disponível);
- dados dos isoladores (tipo, material, quantidade, etc.);
- número de aplicações;
- corrente e duração de cada aplicação;
- tipo de dano em cada componente, em cada aplicação.

6.0 - INFORMAÇÕES OBTIDAS COM OS DADOS CATALOGADOS

Os resultados apresentados a seguir são fruto de algumas avaliações realizadas no banco de dados e servem como parâmetro das informações que podem ser obtidas.

6.1 Quantidade de cadeias reprovadas

Como nos relatórios de ensaio do CEPEL não consta o resultado do ensaio de verificação da tensão residual, que deve ser realizado nos isoladores de disco após o ensaio, e com a constatação do grande número de isoladores quebrados após um ensaio, sem que esse fato fosse levado em consideração, decidiu-se sugerir os seguintes critérios de reprovação:

1. rompimento do pino do isolador;
2. redução do diâmetro do pino, que pode romper mais tarde, devido aos esforços mecânicos da linha de transmissão;
3. redução do diâmetro do pino e da campânula;
4. fusão de ferragens, que podem romper mais tarde, devido aos esforços mecânicos da linha de transmissão;
5. descolamento do revestimento de um isolador polimérico, pois pode permitir a penetração de água e conseqüentemente a ocorrência de uma fratura frágil do isolador;
6. percentual de isoladores quebrados acima de 12,5%, pois dependendo da quantidade de isoladores quebrados a tensão nominal não consegue ser mantida pela cadeia, ocasionando arcos sucessivos, que podem levar à queda do condutor.

Os resultados obtidos com esses critérios podem ser vistos na Figura 1 e pode-se observar que, como esperado, o percentual de cadeias com proteção reprovadas (entre 9% e 16%) é bastante inferior ao percentual de cadeias sem proteção reprovadas (entre 33% e 40%).

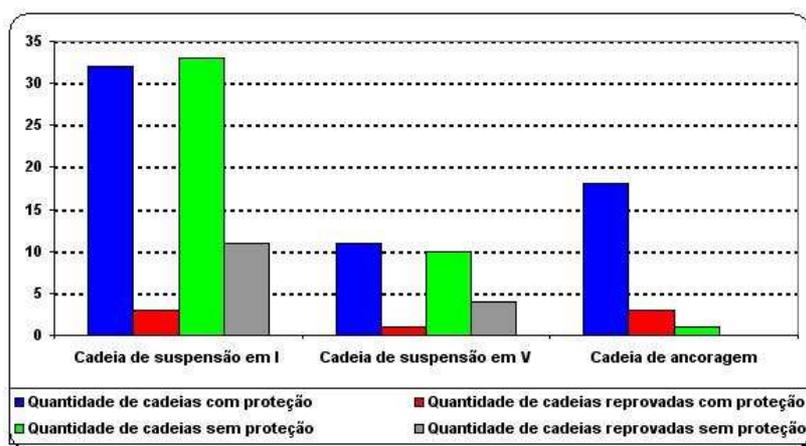


Figura 1 - Avaliação da quantidade de cadeias reprovadas

6.2 Identificação e quantificação dos defeitos

A identificação e quantificação dos danos nas cadeias reprovadas fornecem uma informação importante para a avaliação do desempenho de uma cadeia. Os resultados são apresentados na Figura 2, considerando a seguinte numeração do tipo de dano observado:

1. sem dano;
2. leve fusão;
3. moderada fusão;
4. fusão intensa;
5. perfuração ou ruptura.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que:

- quando a proteção é corretamente projetada, ela cumpre sua função primordial de afastar o arco dos isoladores para reduzir o dano neles;
- em diversas cadeias com proteção, o projeto das mesmas apresentou falha pois a proteção, embora atuando, não foi suficiente para proteger os isoladores;
- nas cadeias sem proteção, o dano nas ferragens é muito maior.

6.3 Avaliação da energia do ensaio

A energia de um ensaio de arco de potência é obtida pelo somatório do produto do quadrado da corrente pela duração da aplicação, em cada aplicação realizada, como pode ser visto na equação abaixo. Como, nem sempre, a solicitação do cliente pode ser atendida pelas instalações do laboratório, a energia total solicitada é desmembrada em uma quantidade maior de aplicações, mantendo a mesma ordem de grandeza solicitada. Este fato explica a existência de ensaios com até 6 aplicações sucessivas.

$$E = \sum_{1}^{n} (I^2 \times T)$$

onde:

E → energia total do ensaio, em Joule;

I → Corrente de ensaio, em A;

T → duração da aplicação, em s;

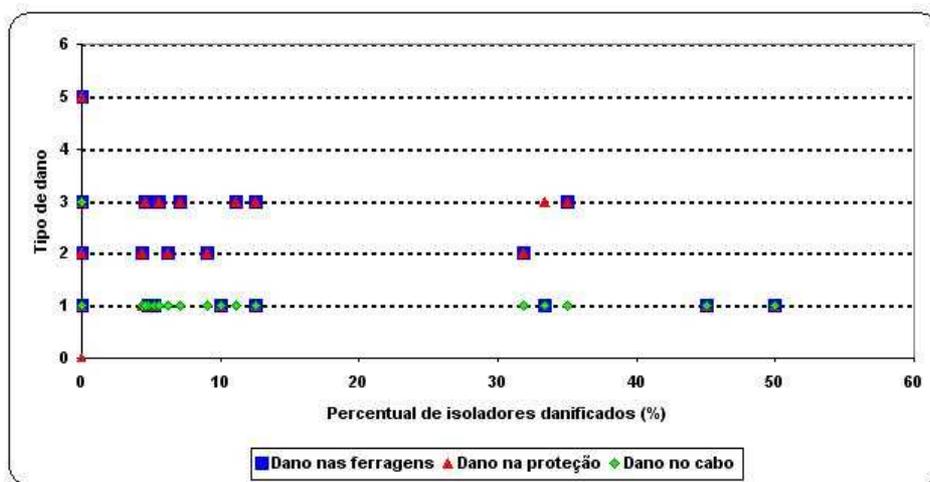
n → quantidade de aplicações.

Os gráficos das Figuras 3, 4 e 5 mostram o percentual de isoladores quebrados, em relação à quantidade de isoladores da cadeia sob ensaio, relacionado com a energia empregada no ensaio, para cada tipo de cadeia, independente se a cadeia possuía

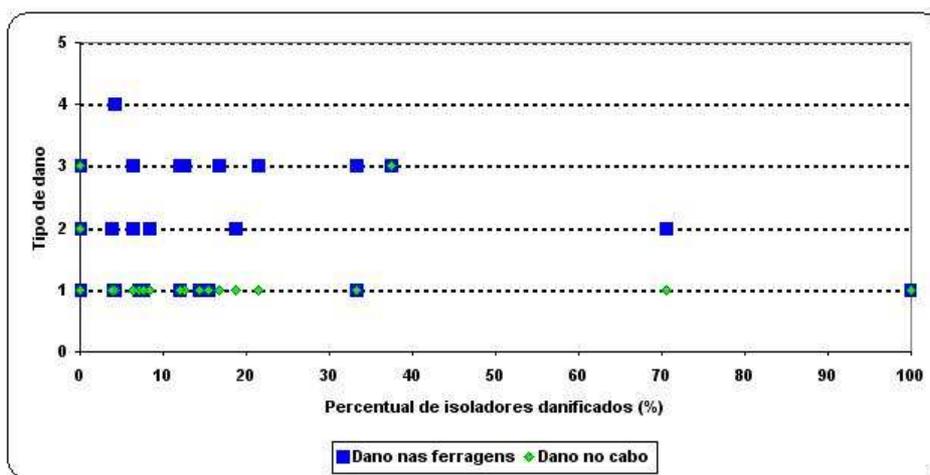
ou não proteção. Pode-se observar que nem sempre um valor elevado de energia de ensaio implica em dano elevado. Diversos fatores devem ser ainda analisados como a existência ou não de proteção, a quantidade de aplicações, etc.

6.4 Avaliação das condições de alimentação e retorno

Para poder se avaliar o grau de dano que cada configuração possível de ocorrer pode apresentar, independente do valor da corrente de ensaio e do tempo de duração, foram traçados os gráficos da Figura 6 e pode ser observado que não se consegue uma boa definição de qual é o arranjo mais crítico.



(a) Cadeias com proteção



(b) Cadeias sem proteção

Figura 2 – Avaliação do tipo de dano nos componentes de uma cadeia

7.0 - CONCLUSÃO

A literatura indica que a função principal da proteção é posicionar o arco longe da cadeia de isoladores mas os resultados apresentados indicaram que o uso de uma proteção nem sempre é necessário, dependendo da configuração do circuito, da cadeia e das características do sistema de interrupção da alimentação.

Não existe, em termos de literatura internacional, um levantamento da natureza do banco de dados de arco de potência apresentado, o que reforça sua importância na realização de estudos comparativos que permitam realizar a avaliação inicial da proteção para uma determinada configuração. Os resultados apresentados neste trabalho mostram somente algumas dentre as diversas comparações que podem ser realizadas com os parâmetros envolvidos com um ensaio de arco de potência.

Analisando os dados do banco, outro fato que se observa é a ausência da repetição de um ensaio, quando uma cadeia é reprovada. Somente 9% dos ensaios, com cadeias reprovadas, foram repetidos, utilizando-se, no novo ensaio, algum sistema de proteção. Esta situação é muito arriscada, pois foi mostrado que 11,5% das cadeias com um sistema de proteção qualquer foram reprovadas, ou seja, a cadeia possuía uma proteção inócua para a solicitação exigida. Assim sendo, a realização de um ensaio de arco de potência se constitui na melhor solução para avaliar corretamente o desempenho do projeto da proteção de uma cadeia de isoladores.

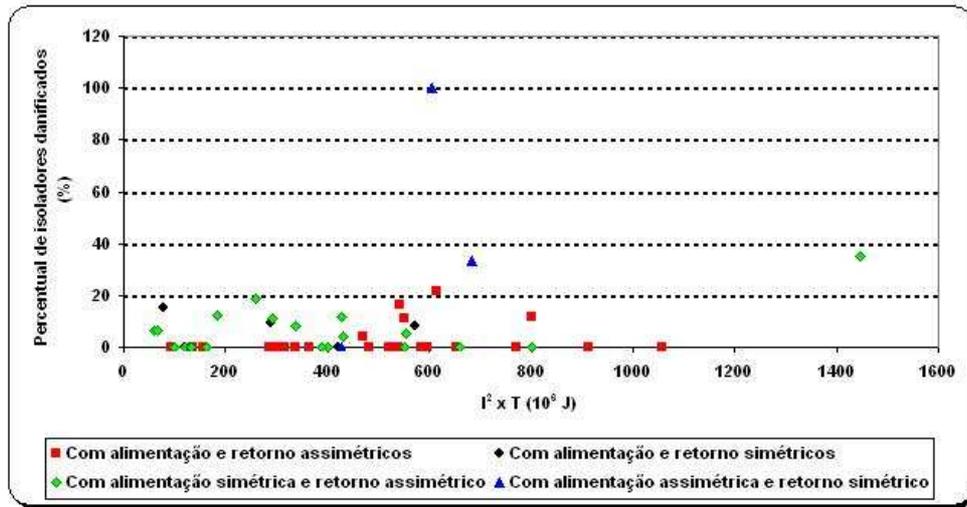


Figura 3 – Avaliação de isoladores danificados em cadeias de suspensão em I

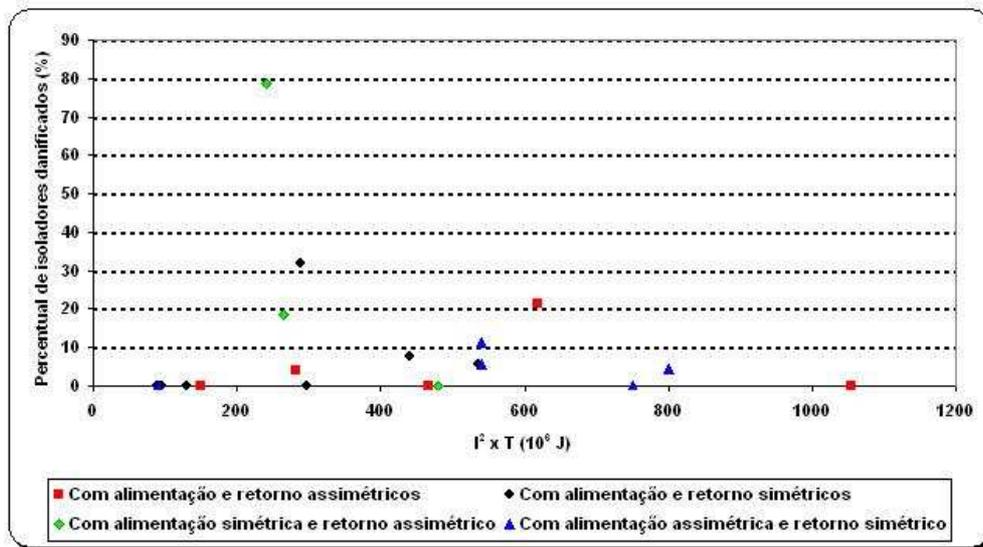


Figura 4 – Avaliação de isoladores danificados em cadeias de suspensão em V

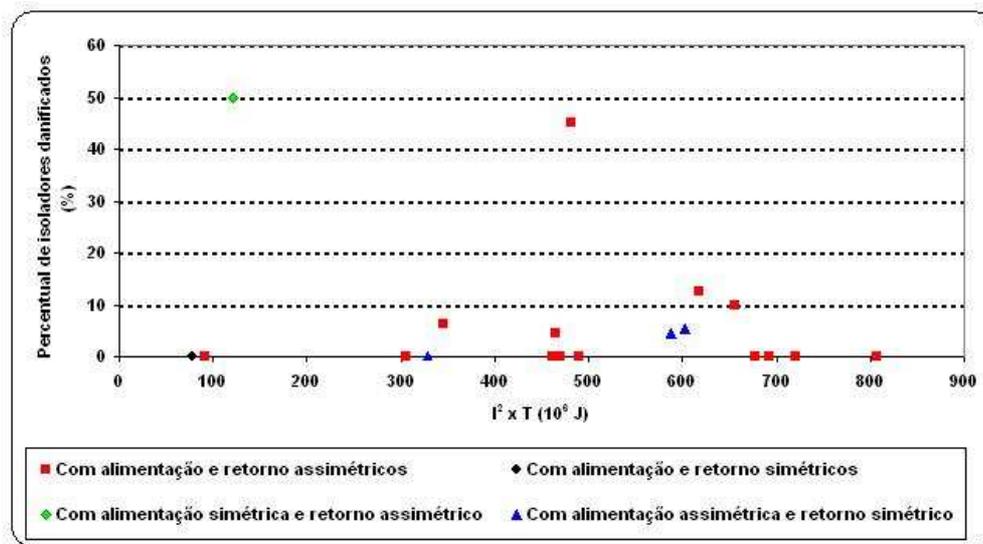
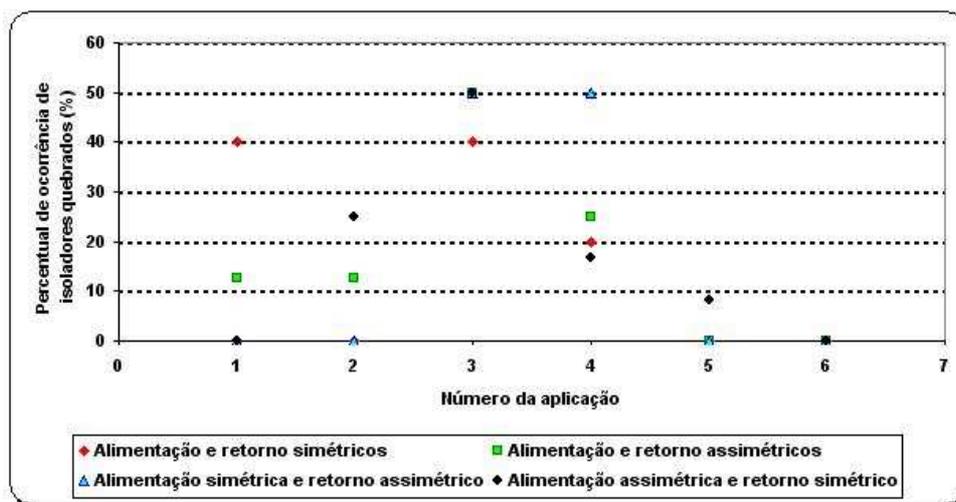
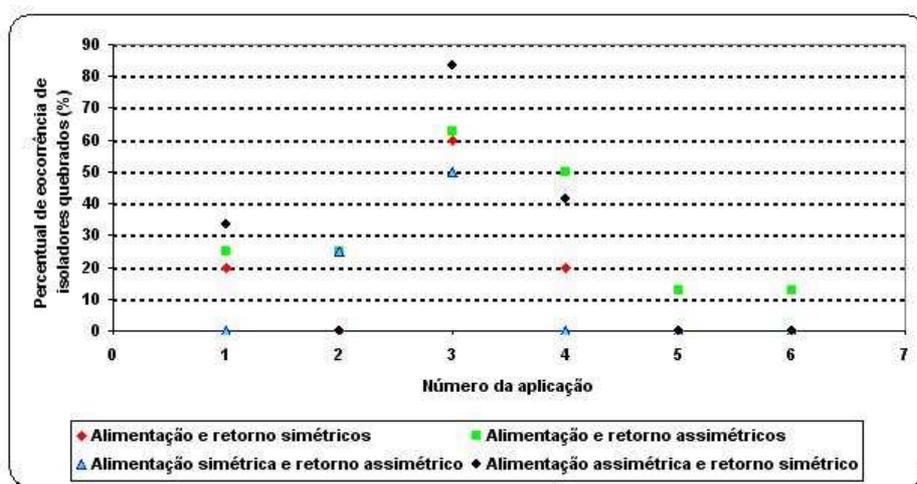


Figura 5 – Avaliação de isoladores danificados em cadeias de ancoragem



(a) Cadeias com proteção



(b) Cadeias sem proteção

Figura 6 – Avaliação das condições de alimentação e retorno

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Sylvio Araújo de Matos - "Comportamento do arco de potência em cadeias de 138 kV e 460 kV do sistema de transmissão da Cesp", III SNPTEE, 1975, artigo CTBA GLT 08.
- (2) D. Fernandes, D.J. Lobley, L. J. Pinto e C Marques: "Considerações sobre o comportamento das cadeias de isoladores das linhas de 800 kV de Itaipu quanto aos arcos de potência" – IV SNPTEE, 1977, grupo GLT.
- (3) NBR IEC-TR 61467: "Isolador de porcelana ou vidro para tensões acima de 1 000 V – Ensaio de arco de potência em cadeias de isoladores", 2005.
- (4) C. Malaguti: " Il problema dell'arco di potenza nel progetto delle linee elettriche aeree ad alta tensione" – ENEL – publicação L5/53-1.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Darcy Ramalho de Mello

Mestrado (1982) e Graduação (1977) em Engenharia Elétrica: UFRJ

Pesquisador do CEPEL, desde 1978, sendo atualmente Gerente de pesquisas do Departamento de Instalações e Equipamentos e Gerente de ensaios da Divisão de Laboratórios de Adrianópolis, atuando na linha de equipamentos para linhas de transmissão e redes de distribuição, com ênfase em isoladores.

Coordenador da Comissão de Estudos de Isoladores (CE 36.1) do COBEI

Eleilson Santos Costa

Engenharia Elétrica em 1984

Empresa: CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 1981

Gerente de ensaios do Laboratório de Alta e Média Potência

Coordenador da Comissão de Estudos CE 17.3 do COBEI

Marcelo Guimarães Rodrigues

Doutorado (2002), Mestrado (1997) e Graduação (1994) em Engenharia Elétrica: PUC-Rio de Janeiro

Empresa: Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL), desde 2002

Pesquisador Gerente de ensaios do Laboratório de Alta e Média Potência

José Antonio d'Afonseca S. Cardoso

Mestrado (2006) em Engenharia Elétrica: COPPE / UFRJ e Graduação (2002) em Engenharia Elétrica: UFRJ.

Empresa: CEPEL, desde 2002.

Pesquisador e Gerente de ensaios da Divisão de Laboratórios de Adrianópolis.

Felipe José Giffoni da Silva

Graduação (2006) em Engenharia Elétrica: UFRJ, cursando mestrado na COPPE

Empresa: CEPEL, desde 2005.

Bolsista de Mestrado da Departamento de Instalações e Equipamentos.