



## Capítulo II

# Proteção de subestações de alta tensão contra descargas atmosféricas

## Cabos guarda e coordenação de isolamento

### INTRODUÇÃO

As subestações de alta tensão são pontos vulneráveis às descargas atmosféricas, tanto por incidência direta como por ondas viajantes pelas linhas de transmissão aéreas. Em geral, são instaladas em áreas afastadas dos grandes urbanos e sem nenhuma proteção natural. Normalmente, as linhas de tensão iguais ou superiores a 138 kV são projetadas com cabos guarda, também conhecidos como cabos para-raios.

Nas linhas de transmissão aéreas, as sobretensões atmosféricas são decorrentes de descargas atmosféricas diretas incidentes nos condutores de fase, quando inexistem cabos guarda, ou por simples falhas da blindagem da linha de transmissão. Em alguns casos ocorrem flash over entre os cabos guarda, que recebem a descarga e os condutores de fase. Se a descarga atmosférica atingir o solo nas proximidades da linha aérea de transmissão haverá indução nos condutores de fase e se formará uma onda viajante na linha. São denominadas de descargas indiretas ou simplesmente backflash. No caso de linhas de transmissão e subestações, mesmo que estejam corretamente projetadas com cabos guarda, no seu nível mais elevado de confiabilidade, há sempre a possibilidade, mesmo que remota, de a descarga atmosférica “furar” o bloqueio de proteção atingindo os condutores de fase da linha ou os equipamentos no pátio de manobra, no caso de subestações. Devemos sempre levar em conta que estamos tratando de fenômenos da natureza que surpreendem por sua imprevisibilidade os melhores projetos contra descargas atmosféricas. Nesse artigo iremos considerar somente a falha na blindagem dos cabos guarda da linha de transmissão.

### DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INCIDENTES DIRETAMENTE SOBRE A SUBESTAÇÃO

As subestações de alta tensão são normalmente protegidas por cabos guarda instalados na parte superior das estruturas metálicas ou de concreto armado, em todos os bays: entrada e saída de linhas, transformação e casa de comando e controle. As correntes decorrentes dessas descargas atmosféricas sobre os cabos guarda são conduzidas à malha de terra que está instalada sob o pátio de manobras, casa de comando e controle e demais estruturas ou edificações que compõem a subestação. A Figura 1 mostra a vista lateral de uma subestação de 138 kV, identificando os cabos guarda e as hastes de proteção contra descargas diretamente incidentes. A posição dos cabos guarda é determinada pelo Método da Esfera Rolante, conforme se observa na Figura 2.

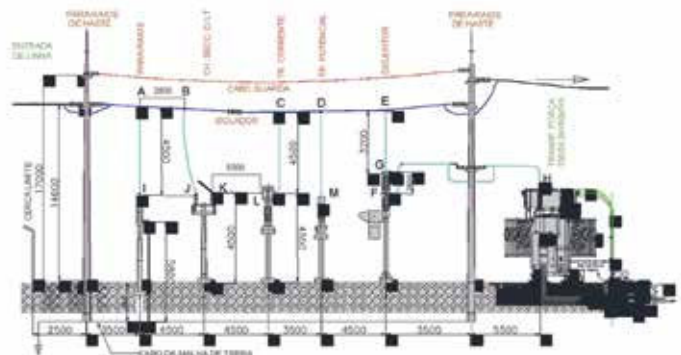


Figura 1 – Vista lateral de uma subestação de 138 kV.



O princípio do Método da Esfera Rolante consiste em definir o raio de uma esfera virtual, de acordo com a tabela da norma anteriormente mencionada, e fazê-la rolar sobre a estrutura a partir do solo girando em todas as direções de forma que nenhum ponto da estrutura entre em contato com a esfera virtual. A Figura 2 mostra a vista de uma subestação de 138 kV e a aplicação dessa metodologia de SPDA nessas estruturas.

O raio da esfera rolante é determinado pela Tabela 2 da ABNT NBR 5419-3:2015 em função da classe do SPDA, ou seja: [1] classe I: R = 20 m; [2] classe II: R = 30 m; [3] classe III: R = 45 m; [4] classe IV: 60 m.

A determinação da seção dos cabos guarda é normalmente definida levando em consideração o valor da corrente de curto-circuito fase e terra que leva o cabo a solicitações térmicas extremas e também as suas características térmicas e mecânicas. O tipo de cabo guarda bastante utilizado é o cabo de aço HS (alta resistência). A seção do cabo guarda pode ser conhecida utilizando-se metodologias do ONS e simulações realizadas pelo EMTP/ATP.

O valor da seção do cabo guarda para atender ao critério da capacidade térmica a partir da corrente máxima de curto-circuito pode ser determinado de forma pela seguinte expressão:

$$S_{\text{ter}} = \frac{1.000 \times \sqrt{T} \times I_{\text{cc}}}{\sqrt{4,184 \times \frac{E \times \rho_d}{\alpha_{20} \times \rho_c} \ln[1 + \alpha_{20} \times (T_{\text{máx}} - T_i)]}} \quad (\text{mm}^2)$$

Segue o significado das variáveis da equação anterior e os dados referentes ao cabo de aço HS:

[1]  $S_{\text{ter}}$  - seção do cabo, em  $\text{mm}^2$ ; [2]  $T = 0,5\text{s}$  (tempo de operação da proteção); [3]  $I_{\text{cc}} = 20 \text{ kA}$  (corrente de curto-circuito simétrica, valor eficaz); [4]  $E = 0,120 \text{ cal.g}^{-1}/^\circ\text{C}$  (calor específico do aço); [5]  $\rho_d = 7,78 \text{ g.cm}^{-3}$  (densidade do aço) [6]  $\rho_{20} = 0,19157$  (resistividade do aço em  $\Omega.\text{mm}^2/\text{m}$  à temperatura de  $20^\circ \text{C}$ ); [7]  $\alpha_{20} = 0,00320$  (coeficiente de variação da resistência do aço com a temperatura); [8]  $T_i = 40^\circ\text{C}$  (temperatura inicial do cabo antes do defeito); [9]  $T_{\text{máx}} = 850^\circ\text{C}$  (temperatura máxima admitida para o cabo de aço).

$$\rho_c = \rho_{20} \times [1 + \alpha_{20} \times (T_i - 20)] = 0,19157 \times [1 + 0,00320 \times (40 - 20)] = 0,20383$$

$$S_{\text{ter}} = \frac{1.000 \times \sqrt{0,5} \times 20}{\sqrt{4,184 \times \frac{0,120 \times 7,78}{0,00320 \times 0,20383} \times \ln[1 + 0,00320 \times (850 - 40)]}} = \frac{14.142,13}{\sqrt{(5.988,72 \times 1,2787)}} = 161,6 \text{ mm}^2$$

$$D_{\text{cabo}} = 14,34 \text{ mm} \Rightarrow D_{\text{ac}} = 5/8" = 15,88 \text{ mm (diâmetro nominal do cabo de aço HS)}$$

Deve-se observar que se a descarga atmosférica conseguir “furar” o bloqueio de proteção formado pelos cabos guarda pode atingir diretamente qualquer equipamento causando danos irreparáveis na maioria das vezes. Essa situação pode ocorrer se houver deficiência na elaboração do projeto da blindagem da subestação ou aderirmos ao fato de que os fenômenos naturais podem surpreender os mais severos cálculos de risco. Essas duas alternativas são algumas das questões que fazem parte das hipóteses



## FERRAGENS ELETROTÉCNICAS

**A mais completa linha do país**

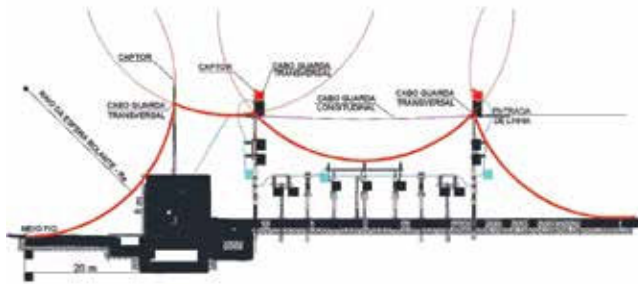
Segurança. Qualidade. Aprovado pelas Concessionárias.



ARRUELAS • PORCAS • PARAFUSOS • PINOS • SAPATILHAS • CINTAS • HASTES • ARMAÇÕES • BRAÇOS



em estudo para a determinação da causa do dano sofrido pelo transformador de 230 kV da subestação Macapá, no Amapá.



**Figura 2 – Proteção da subestação por cabos guarda de uma subestação de 138 kV.**

## SURTOS DE TENSÃO TRANSITÓRIA DECORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INCIDENTES NOS CABOS DE FASE DAS LTs

A outra situação que pode danificar qualquer equipamento de uma subestação é a onda de tensão transiente decorrente de uma descarga direta sobre os cabos de fase de uma linha de transmissão que sai ou alimenta determinada subestação. Nesse caso, a subestação deve ser protegida por um conjunto de para-raios, um por fase, instalado no ponto de conexão da linha de transmissão com a subestação. No entanto, pode ser necessária a instalação de outro conjunto de para-raios na subestação para complementar o nível de proteção do primeiro conjunto de para-raios, provavelmente nas proximidades do transformador de potência.

As descargas atmosféricas, que incidem sobre os condutores de fase das linhas de transmissão, produzem elevadas tensões e correntes de surto que, divididas, viajam em sentidos opostos até os terminais de geração e de carga, conforme pode ser ilustrado na Figura 3. Se a tensão de surto superar a tensão suportável de impulso dos isoladores mais próximos ao ponto de incidência dos raios, ocorrerá uma descarga para a terra através dos próprios isoladores. Caso contrário, a tensão de surto irá trafegar até as subestações localizadas nas duas extremidades da linha de transmissão, onde estão instalados os conjuntos de para-raios de sobretensão, ou seja, nos pontos de conexão da linha com as subestações, e que devem ter capacidade adequada para conduzir à terra a corrente de descarga.

Porém, durante a condução da corrente de descarga à terra, ocorrerá uma queda de tensão nos resistores não lineares dos para-raios, denominada de tensão residual do para-raios, provocando uma tensão de surto entre os seus terminais de fase e de terra. Essa tensão de surto evolui com a mesma taxa de crescimento da onda de surto original ao longo do barramento da subestação, no sentido dos transformadores de potência. Todos os equipamentos, instalados nesse percurso e nos demais bays, devem ser especificados com a tensão suportável de impulso, onda de  $1,2 \times 50 \mu s$ , igual ou superior à tensão de surto esperada em cada ponto de conexão desses



**Figura 3 – Direção das ondas de tensão e corrente.**

equipamentos com o barramento.

Para realizar esse estudo, fundamental à integridade da subestação, deve-se desenvolver um Estudo de Coordenação de Isolamento que tem como objetivo determinar o valor da sobretensão que pode atingir cada equipamento da subestação devido à onda de surto que se propaga para o seu interior decorrente da descarga dos para-raios. Essa onda é inferior ao surto de onda gerada pela descarga incidente que pode ser resultado de uma descarga atmosférica sobre quaisquer uma das linhas de transmissão conectadas ao barramento, ou decorrente de um surto de tensão de manobra.

O estudo de coordenação de isolamento pode ser realizado utilizando-se dois métodos: [1] método convencional, mais apropriado para a análise de suportabilidade dos equipamentos não auto-regenerativos (transformadores, cabos isolados de energia, capacitores etc.); e [2] método estatístico, mais utilizado para análise de equipamentos auto-regenerativos (cadeia de isoladores de suspensão, de vidro ou porcelana, isoladores de apoio, de vidro ou porcelana etc.), normalmente instalados em linhas de transmissão, subestações e redes de distribuição. Esses estudos são realizados, em geral, por meios de programas digitais dedicados ou por meio do TNA Transient network analyser (analisador de transitórios de rede) ou ainda por meio do ATP-EMTP - ElectroMagnetic Transient Program.

O projeto de uma subestação de 138 kV a 550 kV, normalmente, tem início com a elaboração de um projeto básico consistente. O primeiro passo é a seleção da configuração elétrica da subestação e, em seguida, o desenvolvimento do arranjo físico dos equipamentos de pátio, em função das dimensões desses equipamentos, obtidos dos fabricantes, e das distâncias normativas entre fases e entre fase e terra para o nível de tensão do empreendimento. Nessa fase de projeto, devem ser elaboradas as especificações técnicas dos equipamentos que estão sendo utilizados no projeto. A partir dessas

## Referência em Indústria 4.0



Soluções IoT com foco na redução do custo de desenvolvimento, produção e manutenção.


A Mitsubishi Electric oferece uma ampla linha de **produtos e soluções para aplicações IoT** de energia renovável, automação predial, agricultura e processos industriais já adotadas no Brasil, facilitando a integração dos sistemas de tecnologia da informação, o que **melhora a eficiência, reduz custos e aumenta a produtividade** através de coleta, visualização, análise e otimização das indústrias, processos, gerenciamento de utilidades e edifícios.

Somos uma empresa centenária, **referência** no que há de mais moderno em automação industrial, pois **aplicamos nossa tecnologia de ponta em nossas instalações no Japão**, onde produzimos: CLPs, IHMs, inversores de frequência, servo acionamentos, robôs industriais, CNCs, produtos de baixa tensão, monitoramento de energia, sistema supervisorio, entre outros equipamentos utilizados por **diversos clientes ao redor do mundo**.

Visando agregar produtividade e qualidade à Indústria, temos uma **extensa rede de distribuidores e integradores** de automação industrial espalhada pelo país, além de um centro de reparos próprio, reposição de peças originais e atendimento em campo com rapidez e dinamismo. **Conheça a Mitsubishi Electric nos seguintes canais:**



 [mitsubishielectric.com.br/ia](http://mitsubishielectric.com.br/ia)

 (11) 4689-3000

 [mitsubishielectric.com.br/facebook](https://www.facebook.com/mitsubishielectric.com.br)

 [mitsubishielectric.com.br/instagram](https://www.instagram.com/mitsubishielectric.com.br)

 [mitsubishielectric.com.br/linkedin](https://www.linkedin.com/company/mitsubishielectric.com.br)

 [mitsubishielectric.com.br/youtube](https://www.youtube.com/mitsubishielectric.com.br)

Leia o QR Code  
com seu celular  
para baixar nosso  
catálogo geral.



 [qrco.de/cat\\_geral](http://qrco.de/cat_geral)



informações elabora-se o estudo de coordenação de isolamento que é função do arranjo da subestação e das especificações técnicas dos equipamentos como já foi mencionado. O resultado desse estudo pode implicar na necessidade de alterar o arranjo físico e/ou as especificações técnicas para tornar o empreendimento mais econômico. Somente após a aquisição dos equipamentos é possível elaborar o projeto executivo. Dessa forma, os equipamentos adquiridos devem ser fornecidos de acordo com as especificações técnicas fornecidas. Qualquer alteração de projeto, que influencie os estudos de coordenação de isolamento, e também outros estudos realizados, deve ser motivo de reanálise.

No caso de subestações existentes, quando se percebe a queima constante de equipamentos, principalmente durante os dias de chuva na região, é aconselhável que se elabore o cálculo de coordenação de isolamento para verificar se os para-raios de entrada e saída da subestação estão provendo total proteção sobre os equipamentos instalados à jusante.

Com base nas premissas anteriores será desenvolvido um estudo de coordenação de isolamento de uma subestação, isolação a ar, a partir do corte lateral do arranjo físico, mostrado na Figura 1, e muito utilizado em parques eólicos e fotovoltaicos. A potência nominal da subestação é de 60/80 MVA - 138/34,5 kV. Além do arranjo físico da subestação da Figura 1, indicaremos os dados técnicos dos equipamentos que serão utilizados no desenvolvimento do estudo de coordenação de isolamento.

### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS

As normas ABNT NBR - 6939: Coordenação de isolamento e ABNT NBR - 8186: Guia de aplicação de coordenação de isolamento são documentos fundamentais no desenvolvimento desses estudos.

As características técnicas iniciais dos equipamentos instalados entre os para-raios de entrada da subestação e o transformador de potência, conforme visto na Figura 1, estão descritas a seguir. Esses dados correspondem às condições técnicas mínimas necessárias para se iniciar um estudo de coordenação de isolamento:

#### Transformador de potência

- Potência nominal ..... 60/80 kV
- Tensão máxima de operação ..... 145 kV
- Tensão suportável de impulso, (1,2x50 μs)..... 550 kVpico

#### Para-raios de AT

- Tensão nominal ..... 144 kV
- Corrente nominal de descarga ..... 10 kA
- Tensão suportável de impulso atmosférico (1,2x50μs) .. 650 kVpico
- Tensão residual máxima (8x20μs) .....339 kVpico

#### Chave seccionadora AT

- Tensão suportável de impulso atmosférico ..... 650 kVpico
- Transformador de corrente AT**
- Tensão máxima ..... 145 kV
  - Tensão suportável de impulso atmosférico (1,2x50 μs).. 650 kVpico
- Transformador de potencial AT**
- Tensão máxima ..... 145 kV
  - Tensão suportável de impulso (1,2x50 μs) .....650 kVpico
- Disjuntor de potência**
- Tensão máxima ..... 145 kV
  - Tensão suportável de impulso (1,2x50 μs) .....650 kVpico

### MÉTODO DE CÁLCULO DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

Os para-raios de sobretensão (três unidades) devem ser os primeiros equipamentos a serem posicionados na subestação, pois deverão prover a proteção contra ondas de impulso decorrentes de descargas atmosféricas na linha de transmissão que se conecta à respectiva subestação. A atuação dos para-raios de sobretensão, instalados na entrada da linha de transmissão, propiciam a barreira de proteção contra as sobretensões máximas esperadas no ponto de conexão de cada equipamento.

### CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO (LDAT)

A LDAT de 138 kV é constituída por dois cabos por fase, tipo CAA de 300 MCM (Ostrich). A distância entre os centros dos cabos é de 400 mm. O diâmetro do cabo vale 17,28 mm.

$H_{cf} = 20\text{m}$  [altura do cabo fase na torre da Linha de Distribuição de Média Tensão - LDAT];

$H_{mv} = 12\text{m}$  [altura do condutor fase no meio do vão médio do cabo fase da LDAT];

$$H_m = H_{cf} - \frac{2}{3} \times (H_{cf} - H_{mv}) \Rightarrow H_m = 20 - \frac{2}{3} \times (20 - 12) = 14,66 \text{ m} \Rightarrow H_m = 14,660 \text{ mm}$$

[altura média do cabo fase na LDAT];

$$R_{mg} = \sqrt{R_c \times L_c} = \sqrt{8,64 \times 400} = 58,78 \text{ mm}$$

[raio médio geométrico dos dois cabos por fase de 300 MCM];

$L_c = 400\text{mm}$  - distância entre os dois cabos de uma fase, em mm; mm [raio do cabo de 300 MCM]

$$R_c = \frac{17,28}{2} = 8,64 \text{ mm} \text{ [raio do cabo de 300 MCM]}$$

A impedância de surto simplificada, segundo a fonte [1], pode ser dada pela seguinte equação:

$$Z_s = 60 \times \ln \left( \frac{2 \times H_m}{R_{mg}} \right) = 60 \times \ln \left( \frac{2 \times 14,660}{58,78} \right) = 372 \Omega \text{ [impedância de surto da LDAT].}$$



### TENSÃO MÁXIMA ESPERADA NO PONTO DE CONEXÃO DOS PARA-RAIOS DE AT

$$V_{mep\text{r}} = V_{r\text{pr}} + L \times \frac{di}{dt} \times L_{\text{cabo}}$$

$V_{mep\text{r}}$  - tensão máxima esperada, entre fase e terra, no ponto de conexão dos para-raios, em kV;

$V_{r\text{pr}} = 339$  kV [tensão residual dos para-raios, corrente de descarga igual a 10 kA, onda de  $8 \times 20$   $\mu\text{s}$ ];

$L_{\text{cabo}} = 4,5 + 5,80 = 10,3\text{m}$  [veja na Figura 1 o comprimento dos cabos correspondentes à conexão dos para-raios à malha de terra];

$L = 1,4 \mu\text{H/m}$  [indutância do cabo de conexão dos para-raios - valor indicado na NBR 5424, item A.1.1.7];

$\frac{di}{dt}$  - taxa de crescimento da corrente, em kA/ $\mu\text{s}$ ;

$\Delta V = 500$  kV/ $\mu\text{s}$  [taxa de crescimento do surto de tensão; valor recomendado pela NBR 5424].

$$\frac{di}{dt} = \frac{2 \times \Delta V}{Z_s} = \frac{2 \times 500}{372} = 2,68 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

Logo, o valor de  $V_{mep\text{r}}$  vale:

$$V_{mep\text{r}} = 339 + 1,4 \times 2,68 \times L_{\text{cabo}} = 339 + 3,75 \times 10,3 = 377 \text{ kV}$$

(esse é o valor denominado de nível de proteção que os para-raios oferecem aos equipamentos da subestação).

### TENSÃO MÁXIMA ESPERADA NO PONTO DE CONEXÃO DOS EQUIPAMENTOS

De acordo com o item 6.5 da ABNT NBR 8186/2011 – Guia de aplicação de coordenação de isolamento, deverá ser considerada uma margem de segurança de 1,20, ou seja, 20%, entre a tensão nominal suportável de impulso do equipamento e o nível de proteção a impulso do para-raios.

A tensão que será aplicada entre fase e terra em cada equipamento pode ser determinada pela tensão desenvolvida entre os terminais dos para-raios e a terra ( $V_{mep\text{r}} = 377$  kV), anteriormente calculada, adicionando-se a tensão desenvolvida no trecho do cabo (barramento) entre o ponto de conexão dos para-raios e o ponto de conexão do equipamento ( $L_{\text{preq}}$ ), ou seja:

$$V_{mep\text{r}} = 377 + L \times \frac{di}{dt} \times L_{\text{caeq}} = 377 + 1,4 \times 2,68 \times L_{\text{caeq}} = 377 + 3,75 \times L_{\text{caeq}}$$

Logo, essa equação será aplicada para determinar o surto de tensão que atinge cada equipamento, variando-se somente o comprimento do cabo,  $L_{\text{caeq}}$ , desde o ponto de conexão do para-raios, ponto A visto na Figura 1, até o ponto de conexão do barramento relativo ao equipamento em estudo.

### SOBRETENSÃO NA CHAVE SECCIONADORA (PONTO J)

$L_{\text{caeq}} = AB+BJ = 2,80 + 4,5 = 7,30$  m [comprimento do cabo entre os terminais de conexão dos para-raios com o barramento e os terminais da chave seccionadora – veja Figura 1];

$$V_{\text{metc}} = 377 + 3,75 \times 7,30 = 404 \text{ kV}$$

$V_{\text{mecs}}$  - tensão máxima esperada no ponto de conexão da chave seccionadora;

### MARGEM DE PROTEÇÃO DA CHAVE SECCIONADORA

$V_{\text{ics}} = 650$  kV [tensão suportável de impulso da chave seccionadora – ver especificação técnica];

$$F_{\text{seg}} = \left( \frac{V_{\text{ics}}}{V_{\text{mecs}}} - 1 \right) \times 100 = \left( \frac{650}{404} - 1 \right) \times 100 = 60,89\% = 1,60 > 1,2$$

[margem de segurança satisfeita].

### SOBRETENSÃO NO TRANSFORMADOR DE CORRENTE (PONTO L)

A tensão que se estabelece nos terminais dos transformadores de corrente corresponde à sobretensão no ponto J (ou K, desprezando a influência do comprimento da lâmina da chave seccionadora) acrescida da sobretensão desenvolvida no trecho KL.

$L_{\text{caeq}} = AB+BJ+KL = 2,80+4,5+3,30 = 10,6$  m [comprimento do cabo entre os terminais dos para-raios (ponto A) e os terminais da do transformador de corrente];

$$V_{\text{metc}} = 377 + 3,75 \times 10,60 = 416 \text{ kV}$$

$V_{\text{metc}}$  - tensão máxima esperada no ponto de conexão do TC;

### MARGEM DE PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

$V_{\text{itc}} = 650$  kV [tensão suportável de impulso da chave seccionadora – ver especificação técnica];

$$F_{\text{seg}} = \left( \frac{V_{\text{itc}}}{V_{\text{metc}}} - 1 \right) \times 100 = \left( \frac{650}{416} - 1 \right) \times 100 = 56,25\% = 1,56 > 1,2$$

[margem de segurança satisfeita].

### SOBRETENSÃO DO TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (PONTO M)

$L_{\text{caeq}} = AB+BJ+KL+LC+CD+DM = 2,80 + 4,5 + 3,3 + 4,50 + 3,50 + 4,50 = 23,10$  m [comprimento do cabo entre os terminais dos para-raios (ponto A) e os terminais da do transformador de corrente (ponto M)];



$V_{metc} = 377 + 3,75 \times 23,10 = 463 \text{ kV}$  [tensão máxima esperada no ponto de conexão do TP];

### MARGEM DE PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

$V_{itp} = 650 \text{ kV}$  [tensão suportável de impulso do transformador de potencial – ver especificação técnica];

$$F_{seg} = \left( \frac{V_{itp}}{V_{metp}} - 1 \right) \times 100 = \left( \frac{650}{463} - 1 \right) \times 100 = 40,38\% = 1,40 > 1,2$$

[margem de segurança satisfeita].

### SOBRETENSÃO DO DISJUNTOR (PONTO G)

$L_{caeq} = AB+BJ+KL+LC+CD+DE+EG = 2,80 + 4,5 + 3,3 + 4,50 + 3,50 + 4,50 + 3,20 = 26,30 \text{ m}$  [comprimento do cabo entre os terminais dos para-raios (ponto A) e os terminais do disjuntor (ponto G)];

$V_{medj} = 377 + 3,75 \times 26,30 = 475 \text{ kV}$  [tensão máxima esperada no ponto de conexão do disjuntor];

### MARGEM DE PROTEÇÃO DO DISJUNTOR

$V_{idj} = 650 \text{ kV}$  [tensão suportável de impulso do disjuntor]

$$F_{seg} = \left( \frac{V_{idj}}{V_{medj}} - 1 \right) \times 100 = \left( \frac{650}{475} - 1 \right) \times 100 = 36,84\% = 1,36 > 1,2$$

[margem de segurança satisfeita].

### SOBRETENSÃO NO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA (PONTO H)

$L_{caeq} = AB+BJ+KL+LC+CD+DE+EG+FH = 2,80 + 4,50 + 3,30 + 4,50 + 3,50 + 4,50 + 3,20 + (1,50 + 3,50 + 5,50) = 36,80 \text{ m}$  [comprimento do cabo entre os terminais dos para-raios (ponto A) e os terminais do disjuntor (ponto F)];

$V_{medj} = 377 + 3,75 \times 36,80 = 515 \text{ kV}$

$V_{metp}$  - tensão máxima esperada no ponto de conexão do transformador de potência;

### MARGEM DE PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

$V_{itp} = 550 \text{ kV}$  [tensão suportável de impulso do transformador];

$$F_{seg} = \left( \frac{V_{itp}}{V_{metp}} - 1 \right) \times 100 = \left( \frac{550}{515} - 1 \right) \times 100 = 6,79\% = 1,06 < 1,2$$

[margem de segurança não atendida]

Nota: Logo, será necessário instalar um conjunto de para-raios para a proteção do transformador de potência. Caso contrário, o transformador poderá ser danificado, pois os para-raios instalados no ponto de conexão da subestação com a linha de transmissão somente protegerão os equipamentos da subestação até o disjuntor de 138 kV (Ponto G).


### CONCLUSÕES

- Os novos para-raios referidos anteriormente podem ser instalados entre o disjuntor e o transformador fixados a uma estrutura igual à dos para-raios existentes. Também os para-raios poderiam ser instalados numa estrutura metálica fixada na parte superior do transformador, nas proximidades das buchas de alta tensão. Para isso, o transformador deveria ser liberado de fábrica com os para-raios já instalados, ou somente com a estrutura de suporte.
- Se o transformador não foi ainda comprado, seria mais econômico alterar a especificação técnica do transformador elevando o valor da tensão suportável de impulso de 550 kV para 650 kV. Deixamos para os leitores verificar se essa solução atende à margem de segurança de 20% exigida por norma.
- Ainda há uma possível solução que deveria ser considerada, ou seja, deslocar a posição do transformador de potência para um ponto mais próximo ao disjuntor.
- Outra solução poderia ser tentada pelos leitores. Em vez de utilizar o barramento em cabo de alumínio na altura mostrada na Figura 1, deslocar o mesmo até o nível dos terminais dos equipamentos interligando-os entre si. Pode-se utilizar o mesmo cabo de alumínio (300 MCM) ou tubo de alumínio, já que os terminais dos equipamentos estão aproximadamente no mesmo nível. Isso reduziria a zero o comprimento dos cabos de conexão entre o barramento e os terminais dos equipamentos.

### REFERÊNCIAS:

- [1] *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento (nove autores)* - Universidade Federal Fluminense.
- [2] *Catálogos de fabricantes de equipamentos.*
- [3] *Manual de Equipamentos Elétricos – João Mamede Filho – 5ª Edição – LTC – Livros Técnicos e Científicos*
- [4] *NBR 8186/2011 – Guia de aplicação de coordenação de isolamento*

\*João Mamede Filho é engenheiro eletricista e atualmente é diretor técnico da CPE - Estudos e Projetos Elétricos. Foi professor na Universidade de Fortaleza entre 1979 e 2012 e presidente da Nordeste Energia nos anos 1999 e 2000. É autor dos livros *Manual de Equipamentos Elétricos (5ª Edição)*, *Instalações Elétricas Industriais (9ª Edição)*, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência (2ª Edição)* e *Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis (2ª Edição)*.



**MAIS QUE  
ENERGIA,  
DISTRIBUÍMOS  
DESENVOLVIMENTO  
PARA O BRASIL.**

Reconhecida no mercado de transmissão,  
a Alubar também possui condutores para todos os  
empreendimentos de distribuição de energia elétrica.

Nosso portfólio atende projetos elétricos de pequeno  
e grande porte.

Com tecnologia de ponta e profunda expertise no que  
fazemos há mais de 20 anos, levamos mais eficiência  
a importantes empreendimentos da infraestrutura do  
setor elétrico brasileiro.

De Norte a Sul do Brasil, apoiamos e acreditamos no  
crescimento de nossos clientes e do Brasil.

[www.alubar.net.br](http://www.alubar.net.br)

[comercial.cabos@alubar.net](mailto:comercial.cabos@alubar.net)



/GrupoAlubarOficial



GrupoAlubar



/GrupoAlubar



/GrupoAlubar



GrupoAlubar

