



III Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica
III EnICT
ISSN: 2526-6772
IFSP – Câmpus Araraquara
19 e 20 de Setembro de 2018



A IMPORTÂNCIA DOS ELETRODOS DE ATERRAMENTO PARA O SISTEMA HVDC

Luiz Fernando Mariotto¹, Cristiano Minotti², Fabiana Florian³

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, Universidade de Araraquara – UNIARA, Unidade IV, Araraquara - SP, lfernandomariotto@gmail.com

² Orientador, Mestre em Sistemas Dinâmico, Docente e Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica da UNIARA, cristiano_uniara@yahoo.com

³ Co-orientadora, Dra. em Alimentos e Nutrição, Docente do Curso de Engenharia Elétrica da UNIARA, fflorian@uniara.com.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Engenharia Elétrica – 3.04.00.00-7

RESUMO: O trabalho mostra a aplicação e a utilização do eletrodo de aterramento no sistema *High Voltage Direct Current* (HVDC), para transmissão de grandes potências a longas distâncias, comparando o custo benefício entre os sistemas de Corrente Contínua (CC) e os de Corrente Alternada (CA). Apresentaram-se os tipos de eletrodo, sua importância e a necessidade de projetos e o comissionamentos para aumentar a flexibilidade e a confiabilidade da operação dos sistemas bipolares de corrente contínua. O projeto e o comissionamento envolvem alguns requisitos básicos, desde métodos de medição da resistividade do solo, para selecionar uma melhor área para construção do eletrodo, até a aplicação de softwares responsáveis pela simulação das grandezas elétricas e suas influências, no meio ambiente, e agentes externos ao eletrodo. Verificou-se que o eletrodo de aterramento vertical apresenta melhor desempenho elétrico, menor resistência e potenciais de passo e de toque menores.

PALAVRAS-CHAVE: aterramento; eletrodo de terra; hvdc.

INTRODUÇÃO

As Linhas de Transmissão (LT) de energia elétrica podem transportar energia, na forma de Corrente Alternada (CA) ou de Corrente Contínua (CC). O sistema CA utiliza redes trifásicas com um ou mais condutores por fase e é o mais utilizado: ele permite o ciclo completo de gerar, de transmitir e de distribuir a energia elétrica. No geral, é mais econômica e segura, devido ao custo dessa tecnologia. Já a transmissão em CC tem sido aproveitada ultimamente para transportar grandes blocos de potência a elevadas distâncias, através de um ou de dois polos, com diversos condutores por polo. Nesse caso, apresenta menores custos e perdas do que a transmissão CA para uma mesma potência transmitida. A transmissão em CC também pode ser utilizada para a interligação de sistemas de frequências diferentes, como o caso de Paraguai e Brasil (PEIXOTTO, 1979).

De acordo com Aoun (2014), a LT de CC torna-se mais econômica que a linha CA para longas distâncias, pois, tem menos condutores, torres mais simples, menor nível de isolamento; contudo, são também necessárias as estações conversoras (CA/CC e CC/CA), que são muito caras. A decisão sobre qual sistema adotar (CA ou CC), sob o ponto de vista de custos, depende basicamente do comprimento da linha,

conforme (Figura 1):

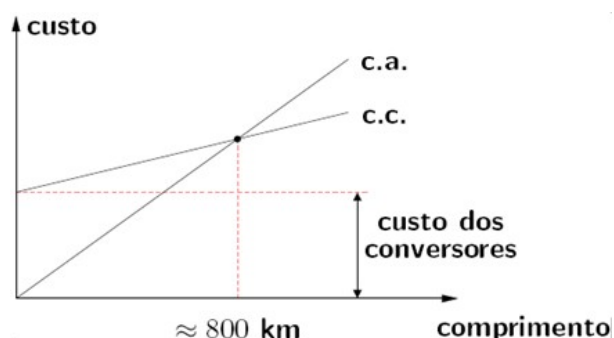


FIGURA 1 – Custo versus comprimento da linha.
Fonte: AOUN, 2014.

Um sistema de transmissão de energia em CC é constituído basicamente de dois polos: um positivo e outro negativo, de conversores ligados em série, de transformadores ligados ao sistema de corrente alternada e de um ponto neutro, representado pela junção entre os conversores, aterrados através de um eletrodo de aterramento. (Figura 2) (AOUN, 2014).

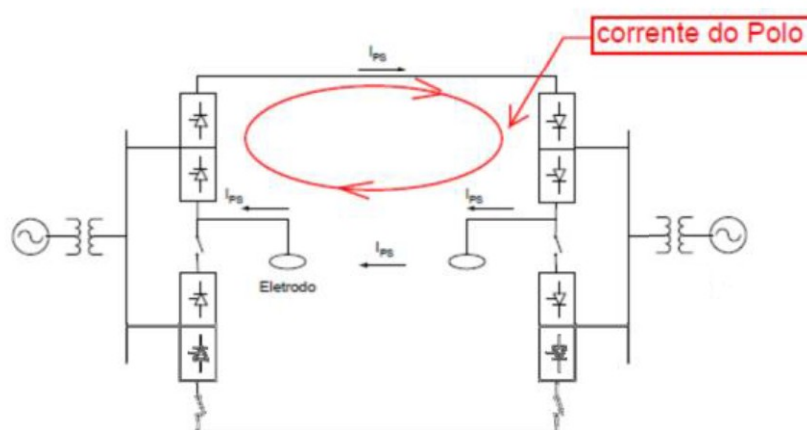


FIGURA 2 – Unifilar de um sistema HVDC em operação monopolar com retorno pelo eletrodo.
Fonte: TOTTI, 2015.

Usam-se os eletrodos de aterramento com a finalidade de aumentar a flexibilidade e a confiabilidade de operação dos sistemas bipolares de CC; existindo uma falha num dos polos, o sistema poderá ficar funcionando com até metade de sua potência nominal, através de circulação de corrente com retorno pela terra.

O objetivo deste trabalho é mostrar a importância dos eletrodos de aterramento para sistema HVDC e, para isso, são apresentados conceitos sobre elo bipolar, formato dos eletrodos de aterramento, critérios a se utilizarem para dimensionamento de um eletrodo de aterramento e aspectos de resistividade do solo.

A metodologia utilizada é a pesquisa bibliográfica sobre as instalações HVDC no Brasil. Como principal referência para este estudo, realizaram-se pesquisas no site da ANEEL e estudaram-se as especificações técnicas do Edital de Leilão NO 007/2008-ANEEL ANEXO 6F-CC – LOTE LF-CC (Sistema HVDC do Rio Madeira).

ESTUDO DE CASO DE UMA INSTALAÇÃO DE ELETRODO DE TERRA NA REGIÃO DE ARARAQUARA

Segundo Totti (2015), um sistema HVDC pode operar em três diferentes modos de operação: monopolar, bipolar e homopolar.

A operação monopolar utiliza apenas um polo de polaridade negativa (com a finalidade de redução da rádio interferência devido ao efeito corona), sendo o retorno da corrente, provido pela terra; pode ser utilizado o retorno metálico em regiões onde seja inviável o uso de um eletrodo de aterramento.

Na operação bipolar, utilizam-se 2 polos: um de polaridade negativa e outro de polaridade positiva. Cada terminal tem 2 conversores, conectados em série no lado CC. A junção entre os dois polos de cada conversor é aterrada, por meio do eletrodo, sendo a corrente de terra praticamente nula na operação bipolar balanceada; assim, cada polo opera independentemente e há menor injeção de harmônicos, se comparado com o monopolar.

Na operação homopolar, utilizam-se 2 polos de mesma polaridade (negativa). Cada terminal tem dois conversores conectados em série no lado CC. A junção entre os dois conversores aterrados e a corrente de terra são o dobro da corrente na operação nominal. Cada polo opera independentemente e ocorre menor injeção de harmônicos, se comparado com o monopolar, em relação ao bipolar.

O modo mais utilizado de transmissão de CC, conforme Totti (2015), é a operação bipolar balanceada (Figura 3), que é formada por um polo com tensão positiva e outro com tensão negativa. O eletrodo de aterramento é usado apenas para descarregar a corrente de desbalanço; porém, em caso de perda de um polo, toda a corrente desse polo fluirá pelo eletrodo de aterramento. Dessa forma, o eletrodo é utilizado como referência de terra para o sistema HVDC, em condição normal de operação, e como retorno, pela terra, para a condição de operação monopolar desbalanceada. Geralmente, utiliza-se o eletrodo do lado do inversor, onde é realizada a inversão de CC para CA.

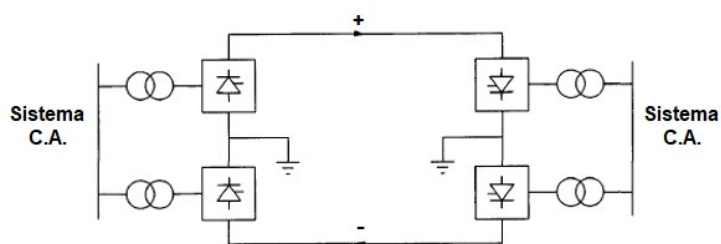


FIGURA 3 – Configuração bipolar
Fonte: TOTTI, 2015.

O eletrodo de aterramento deverá ser projetado de modo a atender os seguintes parâmetros (ANEEL, 2008):

- O local de instalação do eletrodo deve estar distante, no mínimo, de 15 km da subestação conversora.
- Não se admite o risco de circulação de corrente contínua no neutro do transformador conversor capaz de provocar a saturação do mesmo.
- A resistência de aterramento do eletrodo de aterramento deve ser igual ou inferior a 0,35 Ω .

Quando o bipolo estiver operando normalmente, o eletrodo deve suportar a corrente normal de desbalanço do sistema. Quando for necessário operar o sistema em condição monopolar, com retorno de corrente pela terra, numa emergência, ou quando ocorrer desligamento do polo, o eletrodo deverá ser capaz de suportar a corrente nominal de 2625 A do sistema, por um período de tempo limitado a 220 horas por ano.

Durante o tempo que os conversores estiverem bloqueados, os conversores do outro polo continuam conduzindo correntes transitórias com retorno pelo terra.

Em caso de operação bipolar, o eletrodo deve ser dimensionado para operar em regime contínuo, considerando um valor máximo de desbalanço de 40 A (aproximadamente 1,5% do valor da corrente nominal de cada polo).

Os eletrodos têm a tendência de ressecar o solo de duas maneiras, em virtude do aquecimento, que provoca a evaporação da umidade do solo e através do fenômeno da eletrosmose, que é o afastamento da água, no sentido da corrente (VILLAS e PORTELA, 2001).

Assim, quando em operação sob corrente nominal, os gradientes de potencial na superfície do solo devem ser mantidos em níveis baixos, de forma a evitar efeitos danosos em pessoas ou em animais, nas áreas adjacentes.

Qualquer um dos eletrodos pode operar como anodo ou como catodo, dependendo do sentido da corrente do eletrodo para a terra.

Para o eletrodo na configuração horizontal, quando em condição de operação monopolar, a densidade de corrente penetrando no solo pode dar origem ao fenômeno de eletrosmose, que resulta no fluxo da água junto com a corrente; então, a densidade de corrente não deve ser superior a um limite da ordem de 0,5 A/m², para evitar o ressecamento do solo.

O local do eletrodo deve estar situado distante da subestação conversora, de subestações elétricas, de áreas densamente povoadas, de oleodutos, gasodutos ou adutoras metálicas, e de estradas de ferro, devido aos riscos de interferência, que se manifestam sob a forma de circulação de corrente no neutro dos transformadores. Isso pode reduzir a vida útil do transformador e de interferências na proteção catódica dos dutos de óleo, de água e de gás, podendo resultar em desgaste das paredes das tubulações metálicas enterradas.

A condutividade do solo depende, quase que inteiramente, do conteúdo de umidade e dos minerais nele dissolvidos. Dessa maneira, deve-se assegurar a manutenção de um grau apropriado de umidade nas imediações dos eletrodos e, preferencialmente, os eletrodos devem ser instalados em áreas em que o lençol freático estiver em pequenas profundidades, a fim de assegurar a manutenção de um grau satisfatório de umidade. Caso necessário, pode-se recomendar a instalação de um sistema de irrigação.

TIPOS DE ELETRODO DE TERRA

O eletrodo horizontal (Figura 4) é construído através de valas feitas por escaveiras hidráulicas, a uma profundidade média de 4,3 metros. As hastes do eletrodo são fabricadas de ferro silício e são conectadas em série, para o fechamento de um dos circuitos de circulação de corrente: cada eletrodo é constituído de várias seções, separadas entre si por placa de material isolante, que são distribuídas ao longo do perímetro do eletrodo e acomodadas uniformemente, no fundo da vala, sobre uma camada de 0,70 m de carvão coque que é utilizado para melhorar a distribuição de corrente no solo. Posteriormente, o restante da vala é preenchido com terra (Figura 5).

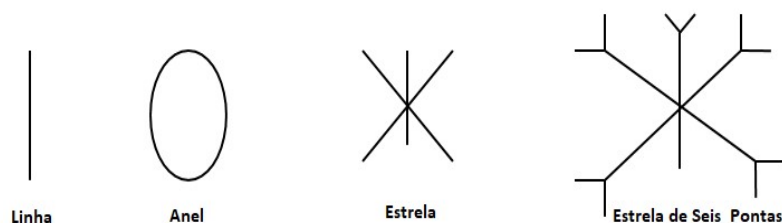


FIGURA 4 – Formatos de Eletrodos de aterramento horizontal (Tipo Raso)

Fonte: AOUN, 2014.

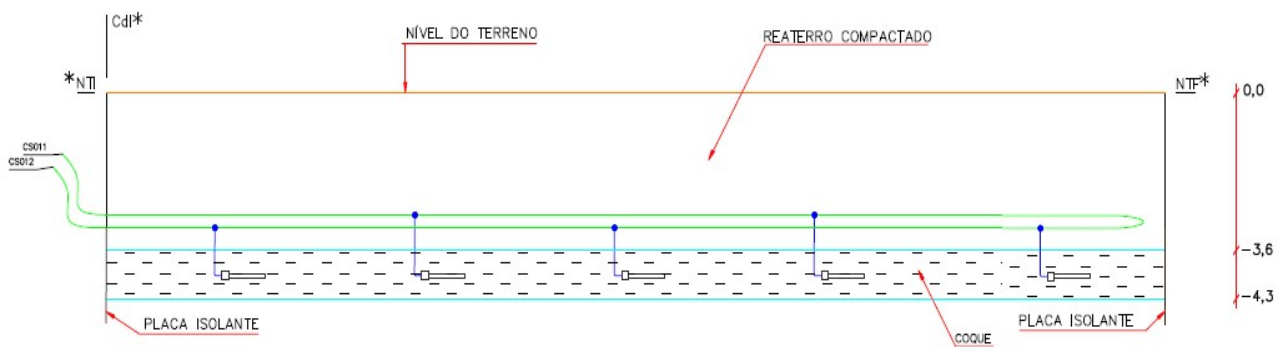


FIGURA 6 – Corte de Eletrodo de aterramento horizontal (Tipo Raso)
Fonte: PIMENTA, 2014.

Para a construção dos eletrodos verticais (Figura 6), utilizam-se perfuratrizes (as mesmas utilizadas em poços artesianos); o preço é cobrado por metro perfurado e depende da dureza da rocha. Em função da quantidade de poços e de sua profundidade, esse tipo de eletrodo acaba tendo um custo de construção mais elevado, com relação ao eletrodo horizontal.

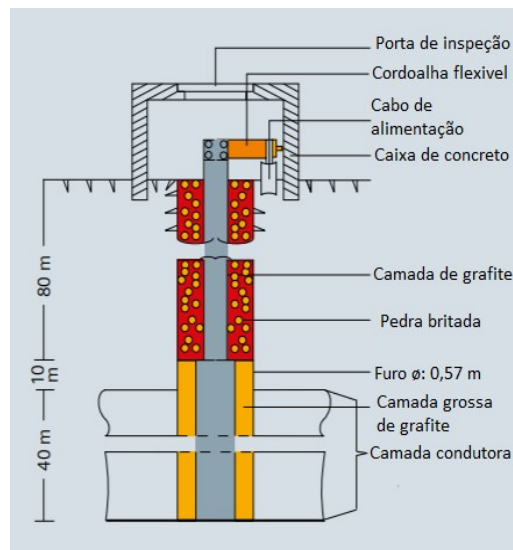


FIGURA 6 – Configuração de um poço típico de um eletrodo vertical.
Fonte: SIEMENS, 2018.

SIMULAÇÃO DA RESISTÊNCIA E CÁLCULO DE DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE NO SOLO.

Para a simulação dos cálculos da resistência de um eletrodo tipo raso em anel com 36 seções, utilizaram-se alguns dados do edital da ANEEL, e adotados valores para efeito de cálculo e análise. Assim, considerou-se o valor 512,16 mΩ como resistividade da primeira camada do solo da região do eletrodo em estudo (FREIRE, 2013).

O valor da resistência de aterramento R de um anel de diâmetro D , feito de um condutor de carvão coque de corte transversal d e enterrado em solo de resistividade uniforme ρ (Ωm), é obtido através de:

$$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{dh}} \quad (1)$$

Onde:

R – Resistência de aterramento (Ω)

ρ – Resistividade (Ωm);

L – Comprimento total do eletrodo (m);

D – Diâmetro do anel (m);

d – Corte transversal equivalente do carvão coque (m);

h – Profundidade do eletrodo (m).

Para o cálculo, o valor da corrente injetado no eletrodo é de 2625 A, que é distribuída em 36 seções. É de 220 horas o valor máximo de corrente nominal que o eletrodo pode operar por ano. Para uma camada de coque, onde se acomodaram as hastes de ferro silício, adotou-se a profundidade do corte transversal de 0,70 m, diâmetro do anel 850 m e 3,60 m a profundidade do eletrodo. Através desses dados, obtém-se a resistência 0,47 Ω . Assim, para se obter o gradiente de potencial na superfície do solo, aplica-se a 1ª. Lei de Ohm, ($R \times I = 0,47 \times 2,625$), obtendo-se, então, 1,23 V (ALEXANDER e SAIDIKU, 2013, p.28).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O eletrodo de aterramento vertical apresenta custo mais elevado do que o eletrodo horizontal; entretanto, a maioria dos eletrodos que se construíram no Brasil foram de poços profundos, porque esses apresentam melhor desempenho elétrico, menor resistência e potenciais de passo e de toque menores.

O dimensionamento de um eletrodo depende da construção de um modelo de solo profundo, até o meio da crosta terrestre (cerca de 21 km de profundidade), e de simulações do eletrodo, para avaliação de seu desempenho elétrico.

O *AutoGrid Pro* é um software de origem canadense, bastante utilizado em projetos desse porte em empresas do setor: ele permite o cálculo da resistência de aterramento e do perfil de potenciais no solo, dentro e fora da área de instalação do eletrodo, assim como da elevação do potencial de terra de estruturas metálicas, enterradas dentro de sua área de influência.

CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi mostrar a importância dos eletrodos de aterramento para sistema HVDC. Para isso, abordaram-se os conceitos sobre elo bipolar, formato dos eletrodos de terra, critérios a serem utilizados para dimensionamento de um eletrodo de aterramento e os aspectos de resistividade do solo e cálculo de resistência de solo.

Este trabalho concluiu que o estudo para a escolha do local de instalação do eletrodo é um dos parâmetros mais importantes a se considerar na elaboração do projeto. Por conseguinte, a princípio, realiza-se um estudo dos possíveis locais de instalação dos eletrodos. A área com a menor resistividade do solo é o ponto principal a se observar, para se evitar interferência em outros sistemas, tais como sistemas de transmissão e de distribuição, oleodutos, gasodutos, sistemas de irrigação e cercas metálicas. Os eletrodos de aterramento são instalados em locais onde eles não coloquem em risco a vida das pessoas e dos animais; por isso são necessárias medições e análises criteriosas antes da definição do local.

Assim, em virtude do exposto, caso os requisitos básicos para a elaboração de um projeto de eletrodo de terra não sejam atendidos, em uma situação extrema, poderão ser até inviabilizados tecnicamente o funcionamento e a operação de um sistema HVDC; para esse tipo de sistema, o eletrodo de terra não é apenas elemento de segurança, mas parte fundamental do sistema de sua operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, C.K. e SADIKU, M.N.O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**, 5 ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2013.
- ANEEL Edital de Leilão NO 007/2008- ANEXO 6F-CC – LOTE LF-CC – Integração do Madeira, 2008.
- AOUN, C. A. **Curso de HVDC - Interligação Elétrica do Madeira**. Apostila de Curso, Araraquara, 2014.
- FREIRE, P.E.F. **Sistemas de Transmissão HVDC Eletrodos de Aterramento**, Apostila de Curso, 2013.
- KIMBKAK, E. W. - **Direct Current Transmission**, vol. 1, Book Wiley, Interscience, 1971.
- PEIXOTO, C.A.O. - **Sistema de Transmissão de Itaipu**, Apostila de Curso, Energia Elétrica, 1979.
- PIMENTA, V. - **Treinamento de Operação IE Madeira**. Apostila de Curso, Araraquara, 2014.
- SIEMENS - **HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT TRANSMISSION**
<https://www.energy.siemens.com/rupool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC-Proven-Technology.pdf> .
Acesso em 11 junho 2018.
- TOTTI, D. C. **HVDC – High Voltage Direct Current – Interligação Elétrica do Madeira**, Araraquara, 2015.
- VILLAS, J.E.T e PORTELA, C.M, XVI-SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, **O Fenômeno da Electrosmose e Sua Influência na Operação Segura de Eletrodos de aterramento de CCAT**, 2001 <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/02/O-FENO%CC%82MENO-DA-ELETROOSMOSE-E-SUA-INFLUE%CC%82NCIA-NA-OPERAC%CC%A7A%CC%83O-SEGURA-DE-ELETRODOS-DE-TERRA-DE-CCAT.pdf>. Acesso em 11 junho 2018.