



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 Mariotto<sup>1</sup>, Cristiano Minotti<sup>2</sup>, Fabiana Florian<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Orientador, Mestre em Sistemas Dinâmico, Docente e Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica da UNIARA, cristiano\_uniara@yahoo.com

<sup>3</sup> 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.

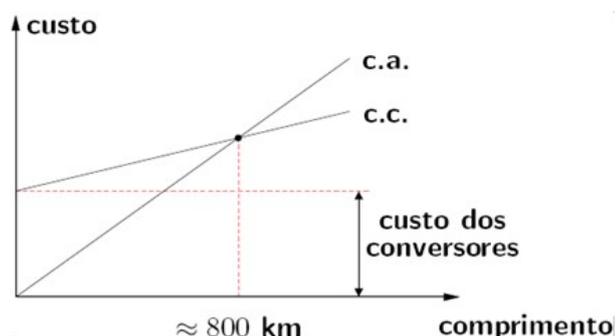
**PALAVRAS-CHAVE:** aterramento; eletrodo de terra; hvdc.

## 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).

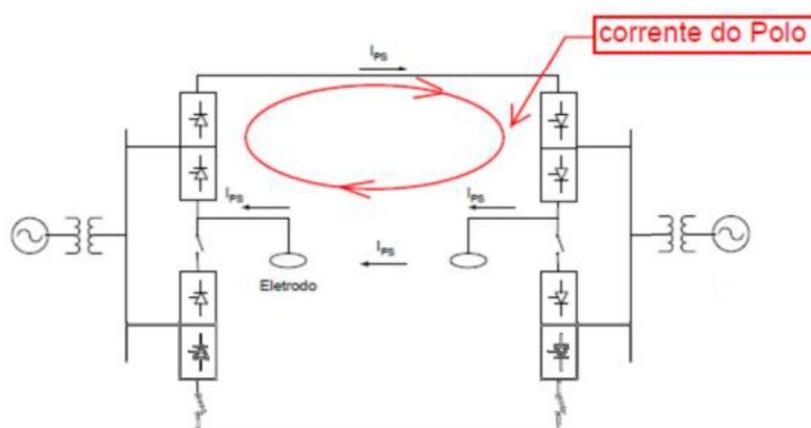
De acordo com Aoun (2014), a LT de CC torna-se mais econômica que a linha CA para longas distâncias, pois, tem menos condutores, torres mais simples, menor nível de isolamento; contudo, são também necessárias as estações conversoras (CA/CC e CC/CA), que são muito caras. A decisão sobre qual sistema adotar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

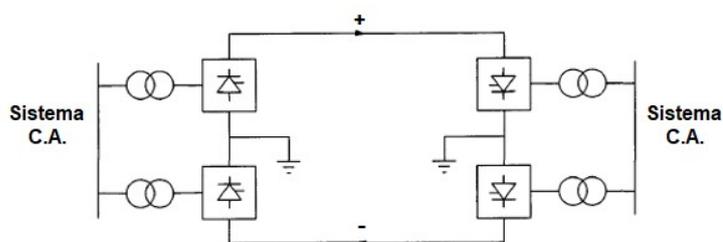
Segundo Totti (2015), um sistema HVDC pode operar em três diferentes modos de operação: monopolar, bipolar e homopolar.

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  $\Omega$ .

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/m<sup>2</sup>, 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.

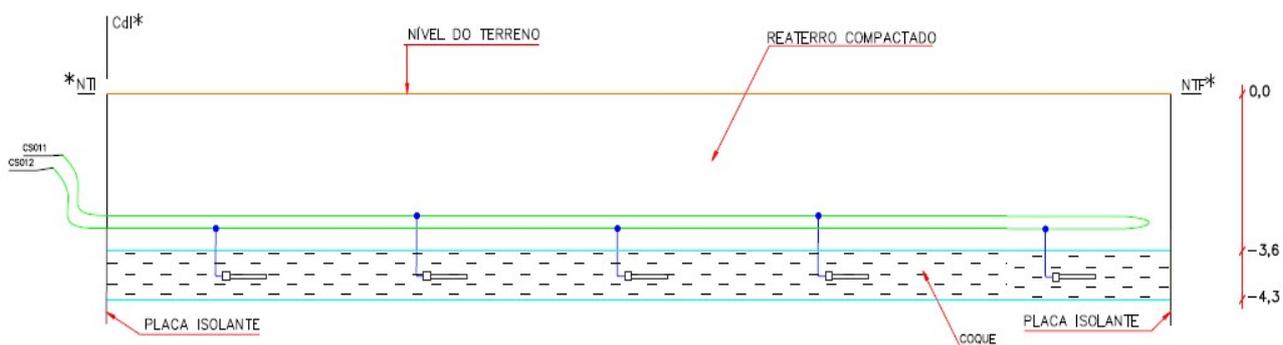
## TIPOS DE ELETRODO DE TERRA

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)**

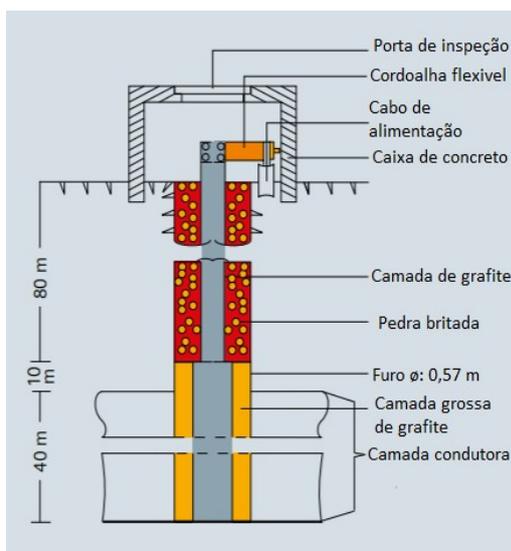
Fonte: AOUN, 2014.



**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 artesanais); 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  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ), é obtido através de:

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

Onde:

R – Resistência de aterramento ( $\Omega$ )

$\rho$  – Resistividade ( $\Omega\text{m}$ );

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  $\Omega$ . 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.