



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

CB/GSE/14

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO 8**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE**

**METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE ELETRODOS MARINHOS EM SISTEMAS CCAT**

**John Graham (\*)  
STATE GRID BRAZIL H.**

**Liu Guijun  
STATE GRID BRAZIL H.**

**Paulo Cesar Vaz Esmeraldo  
STATE GRID BRAZIL H.**

**Mauro Carmello  
CESI BRASIL**

**João Ignácio da Silva Filho  
JISF1 ENGENHARIA E CONSULTORIA**

**RESUMO**

O Informe Técnico (IT) apresenta procedimentos e metodologias aplicadas para o dimensionamento de eletrodo de retorno em contato com a água do mar de sistemas CCAT. Existem três tipos de eletrodos em contato com a água do mar: lacustre, marítimo e praiano. O diferencial desses eletrodos em alternativa aos eletrodos terrestres é a alta condutividade da água do mar, resultando em eletrodos com resistência de aterramento mais baixa e instalações com menores áreas de ocupação e interferências em terceiros. Para as correntes de operação específicas para o Bipolo II do sistema de transmissão de Belo Monte, as resistências de aterramento dos eletrodos lacustre, marítimo e praiano estudados são, respectivamente, 0,0537  $\Omega$ , 0,0109  $\Omega$  e 0,1101  $\Omega$ , enquanto que, o edital da ANEEL especifica 0,35  $\Omega$  para eletrodo terrestre. As dimensões dos eletrodos em contato com a água do mar são da ordem de uma centena de metros e do terrestre de 1 a 2 km. O modelo de solo foi obtido com medições magneto telúricas de pontos do litoral das baías de Sepetiba e Mangaratiba, Rio de Janeiro. Um dos grandes desafios para o dimensionamento de eletrodos são as influências e interferências nas pessoas, fauna e flora aquática e em estruturas metálicas, causadas pelos campos elétricos e magnéticos gerados pela circulação de corrente no eletrodo. Em substituição a modelos analíticos simplificados, no IT é utilizada uma ferramenta computacional que emprega a técnica de elementos finitos para obter uma solução numérica mais próxima da realidade.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transmissão em CCAT, Eletrodos de terra submersos no mar, interferências elétricas

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Um sistema de transmissão de alta tensão em corrente contínua (CCAT) é constituído por estações conversoras, linha de transmissão e eletrodos de aterramento ou retorno. O eletrodo de aterramento é formado por vários elementos enterrados no solo ou submersos na água do mar, em um meio condutivo que depende das características da região em que é instalado, permitindo a operação de sistemas de transmissão em CCAT com retorno pela terra e mar. A função do eletrodo é injetar correntes elevadas na terra com o mínimo de interferências no meio ambiente e em instalações existentes em suas proximidades, o que é possível desde que a resistência do eletrodo seja baixa, reduzindo o aquecimento e o aumento do potencial elétrico no seu entorno. O modelo do solo tem grande influência no dimensionamento do eletrodo, uma vez que é determinante na circulação da corrente, afetando o potencial elétrico no eletrodo. Os eletrodos de aterramento servem, também, como potencial de referência para garantir uma operação segura das válvulas conversoras.

A operação monopolar de sistemas de transmissão CCAT bipolar só ocorre em situação de emergência e, nesta condição, o eletrodo deve ter capacidade de escoar altas correntes por um curto período de tempo. Dependendo da polaridade, o eletrodo de terra pode operar como catodo ou ânodo. No catodo a corrente flui da terra para o eletrodo e no ânodo a corrente flui do eletrodo para a terra. Num sistema bipolar equilibrado o eletrodo é reversível, ou seja, a sua polaridade muda automaticamente de acordo com o polo da linha de transmissão que se encontra fora de operação.

(\*) Avenida Presidente Vargas, n° 000 – sala X 00 - Bloco X – CEP 99.999-999 Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Tel: (+55 21) 2223-7386 Cel: (+55 21) 98759-3663 – Email: john.graham@stategrid.com.br

Para melhor aproveitar as características de meio ambiente condutor da corrente, os eletrodos de aterramento são instalados enterrados no solo ou submersos na água do mar e são nomeados de:

- Terrestre - enterrado no solo, longe da costa e acima do nível da água do mar.
- Praiano - enterrado na areia da praia e abaixo do nível da água do mar, de tal forma que o eletrodo faça contato com a água salina mesmo na maré baixa, mas não diretamente no mar.
- Lacustre - imerso no mar, abaixo do nível da maré baixa, com a parte ativa do eletrodo suspensa e permanentemente submersa na água do mar, dentro de uma pequena área protegida por um quebra mar natural ou artificial e sem impedimento da circulação da água da lagoa com o mar. Caso necessário, esta área é protegida contra acesso de pessoas e peixes.
- Marítimo - instalado no fundo do mar, totalmente submerso na água salgada e afastado da costa a uma distância mínima de 100 metros, numa profundidade máxima de 35 m.

A escolha do tipo de eletrodo mais adequado para um sistema de transmissão depende de diversos fatores, tais como: localização, interferências em seres vivos e instalações, dimensões, sobreaquecimento, facilidade de manutenção e acesso, impacto visual, entre outros, e é uma decisão técnica, econômica e de proteção ao meio ambiente que envolve várias áreas de conhecimento da engenharia, geografia, geologia, geofísica, química, biologia etc [1-4].

No Brasil, as estações conversoras dos atuais sistemas de transmissão CCAT estão localizadas distantes do litoral e, por isso, não se cogitou, até então, utilizar um eletrodo diferente do terrestre. Como atualmente o planejamento do sistema elétrico está considerando a implantação de estações conversoras CCAT, mais próximas dos principais centros de cargas, muitos deles localizados ao longo do litoral brasileiro, é factível considerar num futuro próximo, como alternativa aos terrestres, os demais tipos de eletrodos.

Dado a pouca familiaridade e experiência dos especialistas brasileiros com o assunto, com o objetivo de difundir através de uma pesquisa aplicada as várias etapas que devem ser consideradas nos projetos de eletrodos praianos, lacustres e marítimos, foi proposto e aprovado a execução do Projeto de P&D ANEEL "Desenvolvimento de Metodologia Aplicada ao Uso de Eletrodo Marítimo em Sistemas de Transmissão CCAT", tendo como empresa proponente a State Grid Brazil Holding S.A. e como empresa executora o CESI Brasil. A pesquisa está sendo desenvolvida tomando como exemplo a instalação de eletrodo de aterramento em um local das baías de Sepetiba e Mangaratiba que atenderia à estação conversora do Terminal Rio, do sistema de transmissão CCAT do Bipolo II de Belo Monte. O P&D está em desenvolvimento e neste IT serão apresentados os resultados parciais do dimensionamento dos eletrodos praiano, lacustre e praiano. Não serão discutidos os assuntos relacionados ao meio ambiente, que é de extrema importância para a escolha do local e do tipo de eletrodo a ser implantado em uma instalação real.

## 2.0 - CONSIDERAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DE ELETRODO DE RETORNO

O dimensionamento de eletrodos de aterramento é realizado por métodos de cálculo e medições de campo. O modelo de solo, a corrente a ser injetado no eletrodo, a densidade de corrente na superfície dos subeletrodos, os níveis de campo elétrico e de potenciais no solo e no meio ambiente são fundamentais para o dimensionamento adequado do eletrodo. Os estudos de desempenho do eletrodo têm como base equações fundamentais da física e seu dimensionamento em um meio homogêneo é calculado com a solução das equações de Maxwell considerando a corrente contínua em regime permanente e o desacoplamento entre campo elétrico e magnético. A solução do problema pode ser obtida por aproximações analíticas ou numéricas. Como se trata de processos físicos que envolvem um espaço tridimensional, o método de elementos finitos 3D tem mostrado eficiência para a solução das equações diferenciais que descrevem os fenômenos. O estudo apresentado utilizou o método de elementos finitos para dimensionar o eletrodo, através do programa computacional COMSOL Multiphysics® [6].

Além das características do sistema elétrico, no dimensionamento do eletrodo deve-se considerar os limites dos parâmetros elétricos para evitar as interferências eletromagnéticas em seres vivos e instalações de terceiros. No eletrodo em si, é importante considerar a corrente máxima e sua distribuição em cada subeletrodo evitando, no caso dos eletrodos em contato com a água do mar, uma densidade de corrente que venha a provocar reações químicas que podem produzir gases ou outras substâncias químicas, sendo o mais comum a geração de cloro. Vários outros aspectos devem ser considerados: exposição de seres humanos e da fauna e flora marítimas a campos eletromagnéticos; corrosão em instalações metálicas, em especial as de grandes dimensões, tais como, tubos e dutos desprotegidos ou não, enterrados ou não, linhas de transmissão; interferências em linhas de transmissão, distribuição e de transformadores (1-4).

### 2.1 Escolha do tipo de eletrodo

A escolha entre os quatro tipos de eletrodos é um processo complicado que envolve comparações técnica e econômicas e a existência de um local adequado seguro e amigável para o meio ambiente. Entre os fatores que devem ser considerados na escolha da melhor alternativa estão: distância da estação conversora, de subestações, tubulações metálicas enterradas e de cabos condutores; resistividade do solo predominante nas vizinhanças da estação conversora; critérios de operação e tempo de duração de cada condição de operação; filosofia de operação e manutenção; custo de instalação; possibilidade de uso do local escolhido; segurança no local; mitigação das interferências com o meio ambiente e instalações de terceiros. Nos eletrodos com contato com a água do mar deve ser levado em conta a: salinidade da água do mar; resistividade do solo na região costeira; inclinação do leito,

uniformidade e resistência mecânica do leito marinho, variação das marés e correntes marítimas. Para identificar o local adequado para a instalação do eletrodo, é recomendável investigar não só as condições do local propriamente dito, mas a região de suas vizinhanças, num raio de pelo menos 10 km. O ideal é que, numa primeira etapa sejam estudadas as várias possibilidades de instalação do eletrodo, para que seja tomada uma decisão com base nos aspectos técnicos, ambientais e econômicos da cada alternativa.

## 2.2 Material do eletrodo

A escolha do material ativo do eletrodo deve levar em conta a análise técnico e econômica do empreendimento, sendo a polaridade do eletrodo de terra um fator importante na seleção do material. Nos eletrodos submersos na água do mar a escolha adequada dos materiais do eletrodo é norteada por critérios, como: baixa taxa de dissolução e emissão de cloro em regime anódico; baixa toxicidade; baixa corrosão; custo efetivo do material. Os materiais das hastes de alimentação preferidos para serem usados nos eletrodos em contato com a água do mar são o ferro com alta taxa de cromo silício e o grafite, em alguns casos envoltos por coque. Nos eletrodos do tipo reversível deve-se considerar tanto a operação anódica como catódica e, neste caso, o grafite envolto ou não em coque e as ligas de ferro silicadas possuem bom desempenho.

## 2.3 Interferência do eletrodo no meio ambiente e instalações

As influências e interferências geradas pela operação do eletrodo na sua vizinhança e em regiões afastadas deve ser estudada e avaliada para evitar danos aos seres vivos, ao meio ambiente e a equipamentos. Devem ser avaliadas as seguintes perturbações:

- Influências causados pelos potenciais de toque, passo e transferido em seres humanos; vida marinha; elevação de temperatura e corrosão do eletrodo.
- Interferências em neutros dos transformadores e em objetos metálicos enterrados, sendo nestes últimos a corrosão em tubulações de gasoduto e oleodutos, sistemas de aterramento CA, fundação de torres de linhas de transmissão e na blindagem de cabos.
- Produtos gerados por eletrodos em contato com a água do mar, tais como, cloro, hipoclorito, brometo etc podem resultar em danos ao meio ambiente, principalmente à flora e à fauna marinha.

Para evitar estas perturbações, o ideal seria localizar o eletrodo de terra suficientemente distante dos seres vivos, estruturas e equipamentos que possam vir a ser perturbados pelo eletrodo. Porém, isso nem sempre é possível e, sendo assim, o eletrodo deve ser dimensionado de forma a minimizar essas perturbações. Caso ocorram valores acima dos limites estabelecidos no projeto e em recomendações internacionais, deve ser indicado as providências para mitigar os efeitos danosos do eletrodo, tais como: cercar e sinalizar os limites da instalação, aumentar a proteção catódica e o número de anéis de sacrifício das tubulações, seccionar as cercas e linhas férreas, substituir cabos de comunicação metálicos por fibras óticas etc. Para reduzir a quantidade de geração de gases por eletrólise, pode-se aumentar as dimensões do eletrodo para reduzir a densidade de corrente, usar um material favorável à polaridade do eletrodo, manter um pH baixo na superfície do eletrodo e assegurando uma suficiente troca de água do mar etc.

## 2.4 Dimensionamento do eletrodo de terra

O dimensionamento de eletrodos considera, fundamentalmente, os seguintes aspectos:

- Correntes elétricas de um polo da linha de transmissão na condição de operação monopolar e de emergência e a corrente de desequilíbrio na operação normal.
- Intensidade dos campos elétrico e magnético nas proximidades do eletrodo.
- Redução da vida útil dos materiais do eletrodo por ação eletroquímica, que depende do tempo de cada tipo de operação do eletrodo.

Normalmente a especificação técnica das características do eletrodo estabelece uma distância mínima entre a estação conversora e o eletrodo e os níveis máximos permitidos dos parâmetros básicos da instalação, por exemplo, o valor da resistência de aterramento, os valores máximos e tempo de duração das correntes, a polaridade, vida útil e confiabilidade. Os limites máximos dos efeitos gerados pelo eletrodo são especificados em normas técnicas, resoluções governamentais e em experiências de instalações existentes.

## 3.0 - DADOS BÁSICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DOS ELETRODOS

Este item apresenta os dados básicos utilizados nos exemplos de dimensionamento de eletrodos em contato com a água do mar. Lembra-se aqui, que não é objeto desse IT discutir as restrições ambientais para uma implantação de um eletrodo real, mas, sim, apresentar as técnicas de dimensionamento do eletrodo e suas interferências no meio ambiente.

Serão estudados eletrodos lacustre, marítimo e praiano, considerando uma corrente de operação monopolar em emergência de 3365 A por um período de 300 minutos/ano e a corrente de operação monopolar de 2540 A por 250 horas/ano. A corrente de 3365 A foi utilizada para dimensionar os eletrodos e a corrente de 2540 A para estudar as interferências em instalações afastadas dos eletrodos. Os limites dos parâmetros que nortearam o dimensionamento estão indicados na Tabela 1, considerando as áreas restrita a trabalhadores e aberta ao público.

Tabela 1. Limites dos parâmetros de projeto

Variável	Área	Valor
Resistência de aterramento (Edital ANEEL)	--	0,35 $\Omega$
Densidade de corrente em contato com água salgada	Restrita	100 A/m <sup>2</sup>
	Aberta	10 A/m <sup>2</sup>
CE no solo	Aberta	2,00 V/m
Potencial de passo, corrente emergência	Aberta	7,42+0,0318 $\rho_s$
Potencial de toque, corrente emergência	Aberta	7,42+0,0159 $\rho_s$
Densidade de corrente induzida em elementos metálicos não isolados	Aberta	1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Corrente induzida em neutros de transformadores (% da corrente CA nominal)	Aberta	< 0,3%
	Trifásico (5 pernas do núcleo)	< 0,5%
	Trifásico (3 pernas do núcleo)	< 0,7%

### 3.1 Localização dos eletrodos e modelo de solo

A área escolhida para exemplificar o dimensionamento dos eletrodos é a região das baías de Sepetiba e Mangaratiba. A princípio foram selecionados 8 pontos da região, com distâncias, em linha reta, variando entre 35 km e 60 km da conversora Terminal Rio. Em 4 desses pontos foram realizadas, pela Strataimage [5], medições da resistividade do solo com a técnica magneto telúrico, que resultou no mapeamento das resistividades nas várias camadas do solo. No IT será utilizado o modelo de solo apresentado na Tabela 2. A condutividade da água do mar é 3 S/m.

Tabela 2. Estratificação do modelo de solo

Camada	1	2	3	4
$\rho$ ( $\Omega$ m)	33	425	1400	500x10 <sup>3</sup>
Espessura (m)	70	1500	1900	$\infty$

### 3.2 Materiais e dimensões dos subeletrodos

Considerando que o eletrodo é do tipo reversível, o material do elemento ativo do subeletrodo lacustre é o grafite e dos subeletrodos marítimo e praiano o grafite envolto em coque. As dimensões dos subeletrodos são:

- **Lacustre:** uma barra de grafite com 2 m de comprimento e diâmetro de 0,10 m, com a corrente injetada na extremidade da barra.
- **Marítimo:** 3 hastes de grafite, cada uma com 1,2 m de comprimento e diâmetro de 0,05 m, envoltas em coque e instaladas no fundo de uma caixa circular de concreto com 2 m de diâmetro. Para confinar o coque a caixa é fechada com uma fina camada de concreto magro que permite a circulação da água do mar. Para manter a estabilidade no fundo do mar, a caixa é presa a uma base de concreto circular com 4 m de diâmetro.
- **Praiano:** 4 hastes de grafite, cada uma com 1,2 m de comprimento e 0,10 m de diâmetro, envoltas em coque e acondicionadas na vertical em um tubo de PVC ou fibra de vidro com 8 m de comprimento. Ao longo do tubo existem pequenas perfurações para permitir a livre circulação da água salgada pelo seu interior. Os tubos estão enterrados na praia a uma profundidade que garanta a contínua cobertura das 4 barras de grafite com a água subterrânea da praia.

### 3.3 Configuração dos eletrodos

Uma descrição sucinta dos eletrodos, encontra-se a seguir:

- **Lacustre:** abrigado em uma lagoa artificial com profundidade de 4,5 m, delimitada por uma barragem de enrocamento, sem restrições à circulação da água do mar e sem presença de vida aquática. O eletrodo é composto por 68 subeletrodos com espaçamento não uniforme entre si, de forma a melhor distribuir a corrente total entre os subeletrodos, sendo a menor distância entre os subeletrodos de 1,5 m e a maior de 3 m. Os subeletrodos estão dispostos em duas fileiras espaçadas de 2,4 m. Para evitar efeitos de ponta, os subeletrodos das extremidades das fileiras então dispostos formando uma curva. Os subeletrodos estão instalados em um cais que os mantém permanentemente imersos e não submersos na água do mar, o que facilita os trabalhos de manutenção ou substituição dos subeletrodos. A área ocupada pelo eletrodo tem 85 m de comprimento por 4 m de largura e a lagoa tem as dimensões de 150 m de comprimento por 50 m de largura.
- **Marítimo:** instalado a uma distância de 2 km da costa na profundidade de 10 m é composto por 40 subeletrodos e 120 elementos dispostos em um círculo com 70 m de diâmetro, com espaçamento uniforme entre si. Na disposição circular não é preciso utilizar espaçamentos diferentes entre os subeletrodos para minimizar os efeitos de ponta na configuração do eletrodo. A conexão com a linha do eletrodo é feita através de cabos submarinos de média tensão enterrado a cerca de 1 m de profundidade no leito do mar e protegido para evitar danos, tais como, o arrastamento de âncoras de embarcações. O eletrodo é dividido em 10 seções cada uma com 12 subeletrodos, sendo necessário, portanto, 10 cabos de alimentação. Os campos magnéticos gerados pelos cabos de conexão devem ser avaliados para evitar interferências em bússolas de navegação ou na orientação de peixes.

- **Praiano:** instalado na praia a uma distância de 2 m do mar é composto por 26 subeletrodos instalados numa linha reta e com espaçamento não uniforme entre si, de forma a melhor distribuir a corrente total entre os subeletrodos. A menor distância entre os subeletrodos é de 2 m e a maior de 4 m, sendo o comprimento total do eletrodo praiano de 85 m.

#### 4.0 - RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DOS ELETRODOS

O dimensionamento foi feito com o uso do programa computacional COMSOL, utilizando geração de malha customizada (user controlled), solver “iterativo” (GMRES - Generalized Minimum RESidual e FGMRES - Flexible Generalized Minimum RESidual) e solver “direto” (MUMPS) [6].

Nos métodos de elementos finitos, a forma de representar na malha 3D todos os elementos considerados determina o esforço computacional para a solução do problema estudado. Por isso que o estudo considerou duas simulações. Na primeira os componentes do eletrodo e a região próxima do eletrodo são representadas numa malha refinada e é usada para dimensionar a configuração do eletrodo (número e arranjo dos subeletrodos). Na segunda, utilizada para estudar as interferência e influências em instalações mais afastadas, o eletrodo é representado por um eletrodo equivalente com mesma resistência elétrica do eletrodo e a malha tem um maior refinamento próximas das instalações de terceiros.

#### 4.1 Malha de elementos finitos

Para dimensionar os eletrodos, o volume simulado corresponde a uma esfera com 100 m de raio, com uma camada de 5 m do elemento infinito. A malha de elementos finitos para modelar o volume é formada por milhões de elementos do tipo tetraedros e prismas, com discretização quadrática. Para reduzir o número de elementos da malha e o esforço computacional, foi utilizado a simetria da localização dos subeletrodos em relação a um eixo transversal à costa. Mesmo assim, as simulações foram feitas com uma matriz de 3.000.000 de graus de liberdade. Na Figura 1 estão apresentadas a malha 3D dos eletrodos.

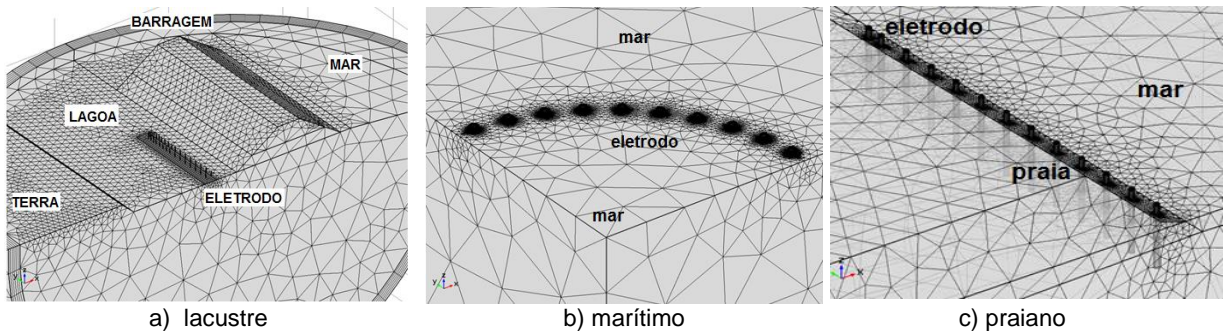


FIGURA 1. Representação dos eletrodos na malha 3D

#### 4.2 Densidade de corrente no subeletrodo

Devido ao acoplamento resistivo entre os elementos e o meio de propagação, nos eletrodos lacustre e praiano os subeletrodos localizados nas extremidades são os mais solicitados. O acoplamento resistivo faz com que no eletrodo lacustre os subeletrodos da fileira mais próxima da barragem sejam maiores que os da outra fileira. O mesmo não acontece com o eletrodo marítimo, pois na configuração circular não há o efeito de ponta, resultando em correntes e densidades de corrente iguais em cada subeletrodo. Na Figura 2 as densidades média de corrente dos subeletrodos lacustre e praiano estão apresentadas em gráficos de barras, onde pode ser observado que a maior densidade de corrente do eletrodo lacustre é  $66 \text{ A/m}^2$  e do praiano  $11 \text{ A/m}^2$ . No eletrodo marítimo a densidade média de corrente em cada subeletrodo é  $13 \text{ A/m}^2$ . Essas densidades são menores que  $100 \text{ A/m}^2$ , limite especificado para o projeto.

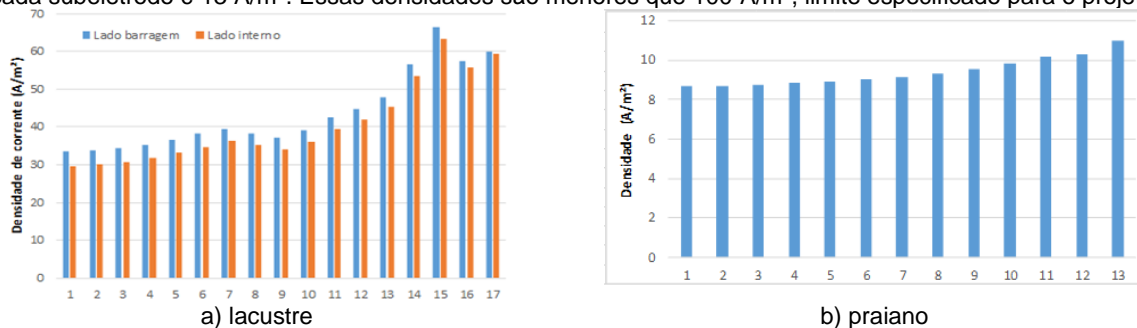


FIGURA 2 - Densidade média de corrente em cada subeletrodo

Nas barras de grafite dos subeletrodos lacustre mais solicitados, na região onde está a alimentação do subeletrodo foram encontrados valores pontuais com densidade acima de  $100 \text{ A/m}^2$ . Esses pontos podem ser eliminados considerando a isolamento que existe na ligação da barra com o cabo de alimentação, o que não foi considerado nas simulações. Caso as densidades continuem acima do valor especificado as desses subeletrodos podem ter seu

diâmetro aumentado, para eliminar o problema.

#### 4.3 Mapeamento da densidade de corrente

A variação da densidade de corrente com a distância do subeletrodo decai de forma acentuada, conforme pode ser visto na Figura 3, onde observa-se que os limites especificados de  $100 \text{ A/m}^2$  e  $10 \text{ A/m}^2$ , respectivamente, para as áreas restrita e aberta, são atendidos. A única observação que se faz é quanto ao eletrodo praiano, que deve ter uma barreira delimitando uma área no mar com distância de 6 m da costa. Lembrando que a distância do eletrodo ao mar é de 2 m, tem-se como alternativa afastar um pouco mais o eletrodo do mar.

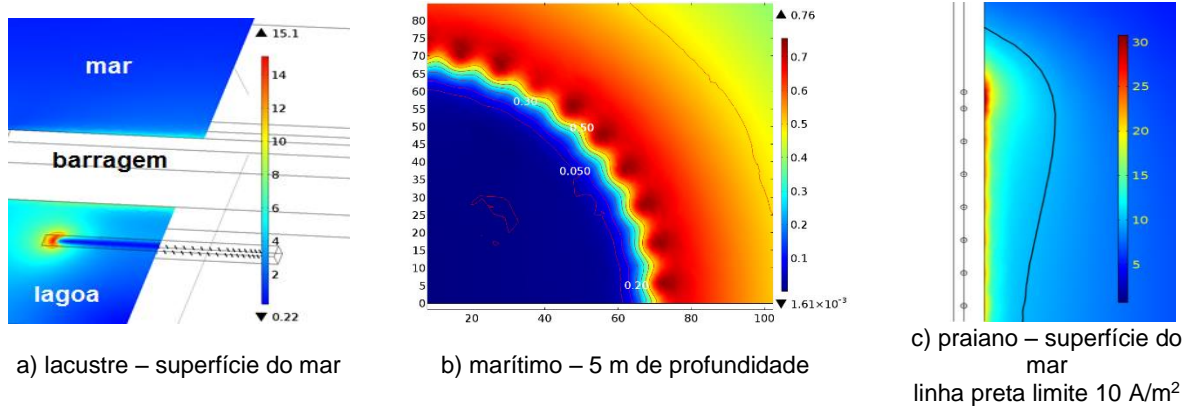


FIGURA 3. Mapeamento da densidade de corrente

#### 4.4 Campo elétrico no subeletrodo e mapeamento da região do eletrodo

O CE médio em cada subeletrodo varia entre  $10,0 \text{ V/m}$  e  $23,3 \text{ V/m}$  no eletrodo lacustre, entre  $8,7 \text{ V/m}$  e  $11,0 \text{ V/m}$  no eletrodo praiano e é de  $3,2 \text{ V/m}$  para o eletrodo marítimo.

Os mapeamentos do CE do eletrodo lacustre para várias camadas estão apresentados na Figura 4 onde pode ser observado que na região próxima dos subeletrodos das extremidades ocorre o maior CE. Os valores máximos no fundo e na superfície no interior da barragem são compatíveis com áreas de circulação restrita a trabalhadores qualificados. Na área junto à costa do mar, o CE na superfície do solo apresenta valores acima do limite especificado para o projeto para área aberta ao público, sendo assim, essa área deve ser restrita a trabalhadores qualificados com uma cerca distante de 10 m da costa do mar.

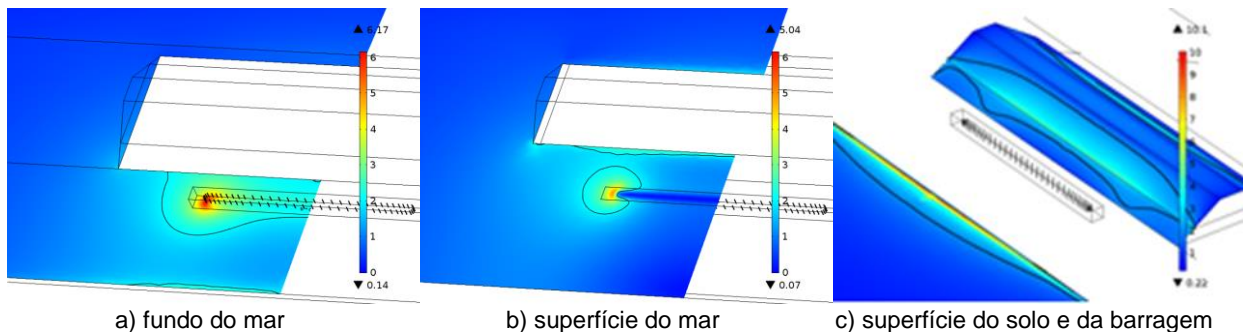


FIGURA 4. Mapeamento do CE do eletrodo lacustre – linha preta limite  $2 \text{ V/m}$

Os mapeamentos do CE do eletrodo marítimo para várias camadas estão apresentados na Figura 5 onde pode ser observado que o CE é menor que o valor especificado e há um acentuado decaimento do CE com a distância e com a profundidade do mar

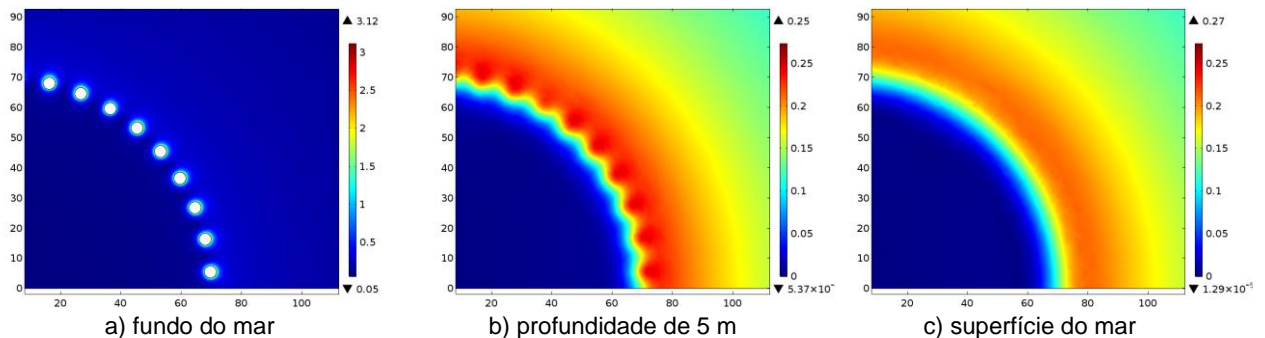


FIGURA 5. Mapeamento do CE do eletrodo marítimo

O mapeamento do CE do eletrodo praiano na superfície do solo e do mar indica a necessidade de uma cerca distante de 10m ao redor do eletrodo para manter a área aberta ao público com o campo elétrico menor que 2 V/m.

#### 4.5 Campo magnético

O campo magnético do cabo de alimentação, com 2 km de comprimento, do eletrodo marítimo está apresentado na Figura 6, para várias profundidades do mar. Na figura está apresentada os 350 m finais do cabo de alimentação e onde se constata que há um decaimento acentuado do CM a medida que se afasta do cabo de alimentação, tanto na horizontal como na vertical. Os maiores valores, da ordem de 300  $\mu\text{T}$ , ocorrem junto ao cabo de alimentação sendo que a uma distância de 10 m o CM é muito baixo.

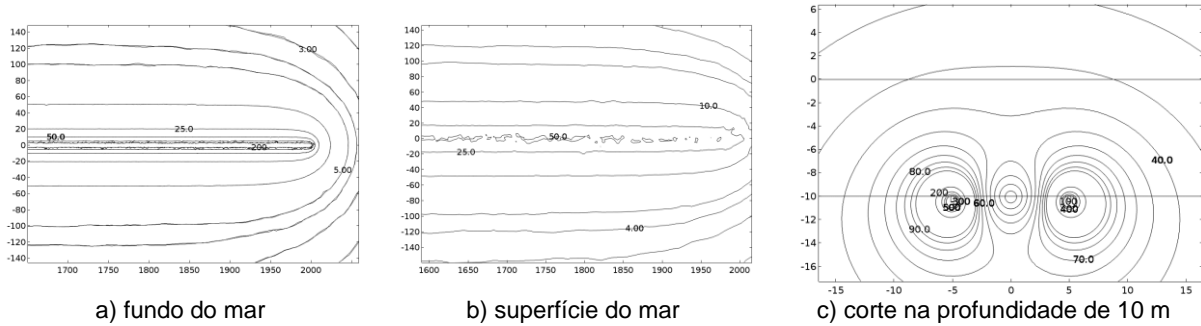


Figura 6. Campo magnético gerado pelo cabo de alimentação do eletrodo marítimo

#### 4.6 Interferência em instalações afastadas

Para exemplificar as interferências do eletrodo em instalações afastas, será considerado o eletrodo lacustre e tubulações com diâmetro de 20 polegadas, paralela e distantes de 1 km e 2 km do litoral, enterrada a 1 m da superfície do solo, com 10 km de comprimento. O revestimento tem 3 mm de espessura e não apresenta falha. Na Figura 7 estão apresentados os mapeamentos da densidade de corrente para a tubulação distante de 1 km do litoral, onde se observa a distorção causada pela presença da tubulação sem revestimento. Chama a atenção que para melhor contraste das cores, a escala dos mapas é logarítmica. A variação da densidade de corrente ao longo das tubulações está apresentada na Figura 8. O trecho da tubulação localizada a 1 km do litoral com densidade de corrente maior que o limite de 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  deve ter proteção catódica. Na Figura 8, ao comparar os gráficos para as tubulações a 1 km e 2 km verifica-se quanto é acentuado o decaimento da densidade de corrente transversal com a distância.

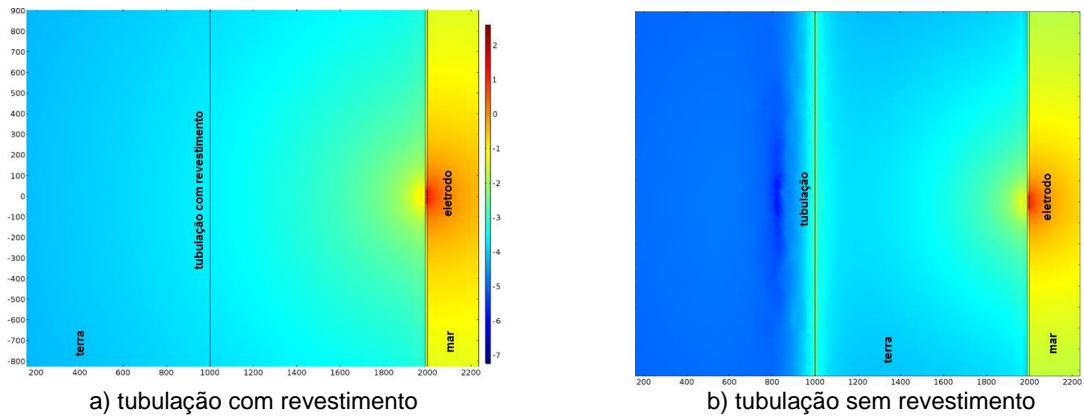


FIGURA 7. Mapeamento densidade de corrente, tubulação a 1 km do litoral, eletrodo lacustre – escala logarítmica

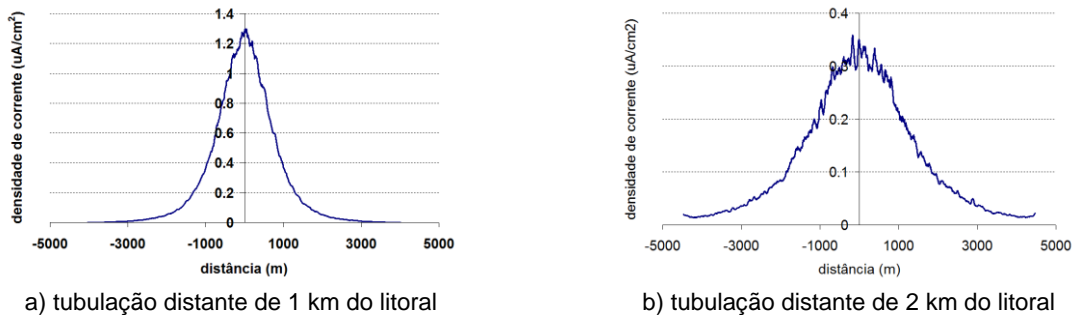
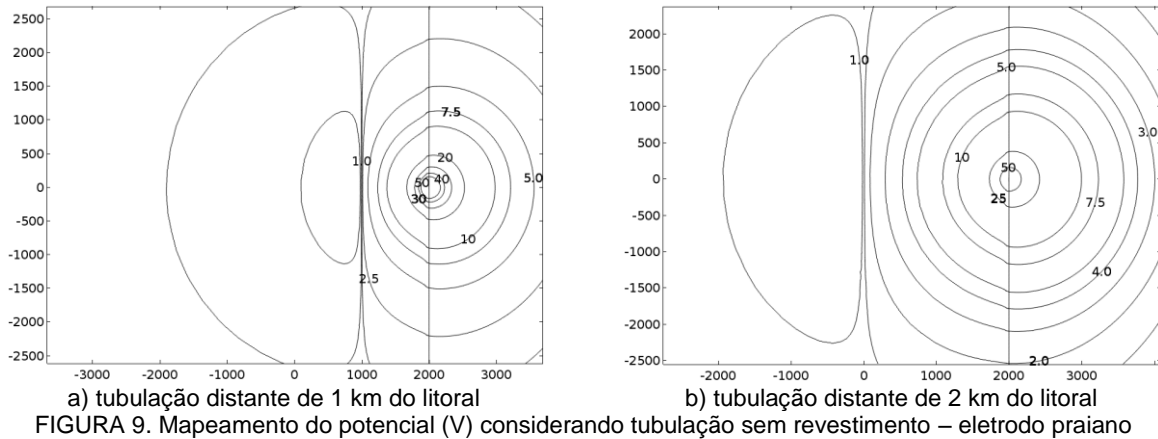


FIGURA 8. Densidade de corrente transversal à tubulação sem revestimento, eletrodo lacustre

Na Figura 9 está apresentado o mapeamento do potencial para as mesmas tubulações, considerando o eletrodo praiano, onde pode ser visto que o potencial junto à tubulação é pequeno, da ordem de 1 V.



## 5.0 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS ELETRODOS ESTUDADOS

Tabela 3. Principais características dos eletrodos estudados

Variável	Lacustre	Marítimo	Praiano
distância da costa (m)	40	2000	2
profundidade (m)	4,5	10	6, na praia
material do elemento	grafite	grafite + coque	grafite + coque
dimensões do elemento	haste Ø 0,10m X 2,0 m	haste Ø 0,05m X 1,2 m	haste Ø 0,10m X 1,2 m
número de elementos	68	120	104
subeletrodo	haste grafite	3 hastes grafite, coque e caixa concreto	4 hastes, coque e tubo PVC perfurado
número de subeletrodos	68	40	26
arranjo	2 fileiras	circular	em linha
dimensões do eletrodo	84 m x 2,4 m	raio 70 m	96 m
resistência de aterramento	0,0537	0,0109	0,1101

## 6.0 - CONCLUSÕES

Pelo fato da condutividade da água do mar ser maior que a de solos, faz com que, para uma mesma corrente, a resistência de aterramento de eletrodos de retorno de sistemas CCAT instalados em contato com a água do mar seja menor que os eletrodos terrestres. Como consequência, os eletrodos lacustre, marítimo e praiano possuem dimensões muito menores que os terrestres, ocupando uma menor área de instalação e quantidade de material, além de diminuir as interferências em instalações de terceiros. O uso da modelagem por elementos finitos 3D mostrou-se adequada para o dimensionamento e avaliação das interferências dos eletrodos e, para diminuir o esforço computacional, podem ser utilizadas duas malhas de elementos finitos: uma para dimensionar o eletrodo e outra para avaliar as interferências em instalações afastadas.

## 7.0 - AGRADECIMENTOS

Os estudos foram realizados no âmbito do Projeto de P&D ANEEL Nº PD-2608-1201/2015 “Desenvolvimento de modelagem para avaliação do uso de eletrodos marítimos em sistemas de corrente contínua”, com o suporte financeiro de empresas proponentes da State Grid Brazil Holding, tendo como entidade executora o CESI Brasil. O projeto encontra-se em execução e teve seu início em 2016, com previsão de término em maio de 2017.

## 8.0 - REFERÊNCIAS

- [1] CIGRE Working Group 14.21 – TF1 – “Summary of Existing Ground Electrode Designs”, 1998
- [2] CIGRE Working Group B4.61 – General Guidelines for HVDC Electrode Design, 2017
- [3] IEC/TS 62344 “Design of earth electrode stations for high-voltage direct current (HVDC) links – General guidelines”, Edição 1.0 2013-0.
- [4] CIGRE Working Group B4.44 ” HVDC Environmental Planning Guidelines”, October 2012.
- [5] STRATAIMAGE CONSULTORIA LTDA, Relatório Aquisição, Processamento e Interpretação de Dados Magnetotelúricos Projeto Eletrodo Marinho,



[6] COMSOL AB, Comsol Multiphysics® Reference Manual, v. 5.2, 2015

## 9.0 - DADOS BIBLIOGRÁFICOS

**John Graham**, nasceu em Northampton, Inglaterra. Gradou-se em Engenharia Elétrica em 1965, pela Universidade de Warwick, Inglaterra.

Sua experiência profissional inclui trabalhos para Teshmont Consultants no Canadá (HVDC Nelson River), e Brown Boveri na Suíça (Cabora Bassa).

Trabalha no Brasil desde 1972, ingressou na ASEA, agora ABB, em 1982 e esteve envolvido no sistema Furnas  $\pm$  600 kV HVDC (Itaipu). Ele trabalhou para a ABB na Índia e no Brasil em sistemas de transmissão, especialmente HVDC. Desde que se aposentou, trabalha como consultor para a SGBH.

**Liu Guijun**, Gradou-se em Engenharia Elétrica em 1987, pela China Three Gorges University e tem mais que 14 anos de experiência em engenharia elétrica. Ele participa nos projetos P&D UHVAC, Multi-infeed HVDC além o de Eletrodos Marítimos.

**Paulo Cesar Vaz Esmeraldo**, nascido em Florianópolis, Santa Catarina. Gradou-se em Engenharia Elétrica em 1972 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Obteve o M.Sc. na UNIFEI em 1976. Sua experiência profissional inclui especificação de equipamentos, estudos de linhas em CA e CC e estudos de planejamento de sistemas elétricos. Trabalhou em FURNAS, CESI Brasil e no momento é Vice-presidente da XRTE. IEEE Fellow em 2000 e recebeu o Technical Award do CIGRE em 2000.

**Mauro Carmello**, nascido em Tanabi, SP. Engenheiro eletricitista graduado pela UNESP (1985) com curso de Especialização em Análise de Sistemas pela Fundação Escola de Comércio Álvares Penteado, Especialização em Administração (FGV/SP) e MBA em Gestão de Negócios com Ênfase no Setor Elétrico (FEA/USP). Exerceu por 28 anos atividades profissionais no Grupo CPFL Energia tendo atuado nas áreas de TI e Engenharia. Atualmente é o Diretor Geral do CESI do Brasil Consultoria Ltda. Palestrante em diversos eventos do setor elétrico, tais como Metering Latin America, Smart Utilities Brazil Forum, SENDI, dentre outros.

**João Ignácio da Silva Filho**, nascido em Guaratinguetá, SP. Engenheiro civil graduado pela UFRJ em 1978 e MSc em 1981 pela COPPE/UFRJ na área de recursos hídricos, com especialização em análise estatística de dados pela ENCE. Exerceu por 33 anos atividades profissionais no CEPEL, na área de linhas de transmissão com ênfase em estudos da ação do meio ambiente em instalações elétricas e vice-versa. Tem várias publicações em seminários e revistas nacionais e internacionais sobre a ação do meio ambiente em LTs, ampacidade determinística e estatísticas de LTs, entre outros.