



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO CATÓDICA DE ESTRUTURAS METÁLICAS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

José Claudio de Faria Telles <sup>(1)</sup>, José Antonio Fontes Santiago <sup>(1)</sup>,  
Simone Louise Delarue Cezar Brasil <sup>(2)</sup>, Henrique Osório Santos <sup>(3)</sup>

(1) Programa de Engenharia Civil / COPPE / UFRJ

(2) Escola de Química / UFRJ

(3) SACOR Siderotécnica S/A

### Resumo

A corrosão representa um elevado custo na indústria do petróleo. Os processos corrosivos devem ser combatidos de forma a se manter a integridade destas estruturas e, neste sentido, a proteção catódica desempenha um papel relevante. Esta técnica é amplamente utilizada no combate à corrosão de estruturas metálicas submersas e enterradas, tais como dutos, plataformas offshore e árvores de natal molhadas.

Atualmente, projetos de sistemas de proteção catódica contam com o auxílio de simulação computacional que, devido à sua generalidade e precisão, muito contribui para o aumento da confiabilidade e redução de custos. A técnica computacional utilizada permite a análise de problemas bidimensionais, axissimétricos e tridimensionais, que são matematicamente descritos pela equação de Laplace, através do cálculo da distribuição de potencial eletroquímico e densidade de corrente sobre a interface estrutura metálica/eletrolito. Isto permite definir a configuração mais apropriada para os sistemas de proteção catódica, incluindo posicionamento de anodos e corrente necessária para manter o potencial em nível de proteção ao longo de toda a estrutura, bem como definir as áreas críticas para inspeção, no caso de estruturas já em uso.

Neste trabalho são apresentados, em forma gráfica, os resultados de simulações de regiões bidimensionais e a simulação tridimensional de um navio-plataforma.

Palavras-Chave: corrosão, proteção catódica, simulação numérica, Método dos Elementos de Contorno

### Abstract

Corrosion problems, in offshore oil industry, are always associated with considerable costs. Corrosion processes should be prevented in such a way as to maintain structural integrity throughout the designed production life and in this sense, cathodic protection systems are found to play an essential role in the maintenance of such structures. Cathodic protection is widely applied to safeguard metallic structures against corrosion in both submerged and buried environments, especially pipelines, offshore platforms and wet christmas trees.

Nowadays, the design of cathodic protection systems can profit from the help of computer simulation techniques which, due to its generality and accuracy, greatly contribute to increase confidence and reduce costs in the process. Computer techniques allow for the analysis of problems involving two-dimensional, axisymmetric and three-dimensional geometries, mathematically described by the Laplace equation, permitting the computation of electrochemical potential and current density distributions everywhere on the interface metallic structure/electrolyte. This information permits not only an optimization of the geometrical disposition of the actual protection system components, including anode positioning and total current required for protection of the complete structure, but also the definition of critical regions for periodic inspection, being therefore important for design and verification of existing structures.

The present work presents, in graphical way, the results of numerical simulations of two-dimensional problems and a three-dimensional representation of the hull of a complete offshore ship/platform.

Keywords: corrosion, cathodic protection, numerical simulation, Boundary Element Method

## 1. Introdução

Seguindo a tendência mundial observada em diversos campos da engenharia, a aplicação de programas computacionais na análise de sistemas de proteção catódica tem sido cada vez mais freqüente [1]. Atualmente existem diversos programas computacionais, de diferentes graus de complexidade, utilizados como ferramenta útil no estudo de sistemas de proteção catódica [2].

Além das aplicações tradicionais de aquisição e armazenamento de dados, o uso de computadores na avaliação de sistemas de proteção catódica pode reduzir custos através da otimização de projetos e determinação de áreas críticas para inspeção.

A grande aplicação de programas computacionais neste tipo de problema se baseia na determinação da distribuição do potencial e da densidade de corrente na superfície de estruturas, tais como plataformas offshore, tubulações enterradas, tanques de armazenamento, navios, entre outros. Esta é uma grande vantagem da simulação numérica em relação aos métodos usuais de projeto que consistem na aplicação de uma série de fórmulas empíricas que não consideram as irregularidades geométricas do sistema e as variações da densidade de corrente e do potencial ao longo da estrutura.

Esta limitação provoca, em certos casos, a superproteção de algumas regiões para garantir a proteção de outras o que, além de elevar o custo do processo, pode causar reações indesejáveis na superfície. Isto impulsionou o desenvolvimento de técnicas numéricas para análise e otimização de projetos de proteção catódica em estruturas enterradas, levando em consideração as variações das condições do sistema.

Os três métodos numéricos mais utilizados neste tipo de análise são: Método das Diferenças Finitas [3], Método dos Elementos Finitos [4] e Método dos Elementos de Contorno (MEC) [5]. Os Métodos das Diferenças Finitas e Elementos Finitos requerem a modelagem do volume do eletrólito para determinação da distribuição do potencial no meio. Levando em consideração que a distribuição do potencial na superfície é o objetivo primário e que a determinação de parâmetros no eletrólito somente faz aumentar tempo e custo da análise, bem como o arquivo de dados implementados, esta é uma desvantagem do uso destes métodos em sistemas de proteção catódica. Desta forma, o Método dos Elementos de Contorno, quando comparado aos demais métodos, é visto como o mais adequado na análise de sistemas de proteção catódica, já que somente o contorno do eletrólito é discretizado. De fato, a análise de sistemas de proteção catódica, visa a obtenção da distribuição de potencial e de densidade de corrente na superfície metálica da estrutura.

Para análise numérica de um determinado sistema, este deve ser dividido em elementos de tamanhos e formas variadas, em função da geometria e do método utilizado. Os elementos apresentam pontos, denominados nós funcionais, para os quais serão determinados os valores de densidade de corrente e de potencial. O sistema de equações através do qual são determinados os parâmetros do sistema, tem sua solução vinculada à aplicação de condições de contorno apropriadas, que podem ser: potencial prescrito, densidade de corrente prescrita ou ainda uma relação (linear ou não-linear) entre potencial e densidade de corrente.

A análise de sistemas não-lineares requer a aplicação da curva de polarização como condição de contorno. Para que haja uma boa simulação do caso prático, as curvas de polarização devem simular, da melhor forma possível, as condições ambientais do meio onde a estrutura se encontra.

Estudos comparativos entre resultados experimentais e numéricos, obtidos através da aplicação do MEC, têm sido efetuados em diversos sistemas de proteção catódica, envolvendo análise bi ou tridimensional, sendo observada uma boa correlação entre os resultados [6].

## 2. Simulação Numérica

O programa em desenvolvimento desempenha duas etapas do projeto: uma como etapa de pré-processamento e outra com etapa de pós-processamento, para visualização em forma gráfica, da variação dos potenciais e fluxo de densidade de corrente em problemas de elementos de contorno. Duas versões têm sido desenvolvidas paralelamente: uma que trata de problemas bidimensionais e axissimétricos e outra, para problemas tridimensionais.

Na versão bidimensional, a fase de pré-processamento consiste na modelagem do problema utilizando os recursos de uma interface gráfica interativa, inserindo informações pertinentes como, por exemplo, a geometria da superfície e a localização de fontes de corrente. O resultado gerado por esta fase é um arquivo contendo os dados que constituem a entrada para o programa baseado no Método dos Elementos de Contorno. Para cada elemento gerado, obtém-se o valor da densidade de corrente e do potencial. Caso seja de interesse, pode-se avaliar estes mesmos parâmetros para qualquer ponto interno à região em estudo. Na etapa de pós-processamento, o programa lê um arquivo com as informações geradas pelo programa base, com os valores de potenciais e fluxos de densidade de corrente calculados, além de outras diversas informações relevantes, e gera, a visualização da distribuição do potencial na superfície.

Na versão tridimensional, para a etapa de pré-processamento, conta-se com um modelador de sólidos gerados a partir de operações de varredura ou rotação [7]. Cilindros, esferas e discos podem ser inseridos e manipulados com este modelador, tornando-se possível especificar praticamente todos os elementos tridimensionais que constituem os modelos geométricos analisados nos problemas numéricos.

A etapa de pós-processamento para a versão tridimensional, em desenvolvimento, está concentrada na geração de triangulações de um conjunto pontos distribuídos no espaço (“tetraedrações”). Este conjunto de pontos em geral descreve uma geometria conhecida obtida do modelador citado acima. A versão atual da implementação permite que tal triangulação seja feita e refinada no interior da geometria. A triangulação 3D obtida também possui a representação de cores implementada para os casos bidimensionais. O programa também deverá possibilitar a interseção dos modelos 3D triangulados e coloridos com planos de corte determinados pelo usuário, para se poder visualizar o interior dos modelos e conhecer a variação interna de potencial.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Problemas bidimensionais

A simulação de superfícies bidimensionais ou axissimétricas pode ser feita a partir da geração de um arquivo de dados incluindo parâmetros tais como a geometria da superfície, a condutividade do meio e o posicionamento das fontes de corrente. A versão axissimétrica tem como objetivo a simulação de estruturas que apresentam simetria radial, tanto de geometria, quanto de fontes de corrente. Esta versão pode modelar, por exemplo, uma Árvore de Natal Molhada.

As Figuras 1 e 2, a seguir, apresentam a tela do programa de geração de dados (esquerda) e a distribuição de potencial, indicada pela variação de cores nas figuras, e de fluxos de corrente indicados pelas setas. Se desejado, a superfície pode apresentar somente a distribuição do potencial, sem o fluxo de corrente e, ainda, podem ser indicadas as equipotenciais.

Estes exemplos didáticos mostram a distribuição do potencial nas superfícies como uma função da resistividade do meio e das fontes presentes que, no caso da proteção catódica, tanto podem ser anodos galvânicos, como de corrente impressa. Como na proteção catódica o potencial da estrutura deve ser mantido abaixo de um valor mínimo, por exemplo  $-800 \text{ mV}_{\text{Ag/AgCl}}$ , a distribuição do potencial calculada desta forma demonstra a necessidade, ou não, de se alterar a disposição das fontes, sua intensidade (corrente impressa) ou a quantidade de anodos galvânicos.

Os cálculos tradicionais de proteção catódica não fornecem nenhuma indicação quanto à relação da variação do potencial com a resistividade do meio e com a disposição das fontes de corrente. Estes cálculos apenas indicam a quantidade de anodos necessária à proteção, ficando a distribuição dos anodos a encargo da experiência do projetista. A simulação numérica se apresenta, então, como uma poderosa ferramenta na avaliação de projetos de proteção catódica.

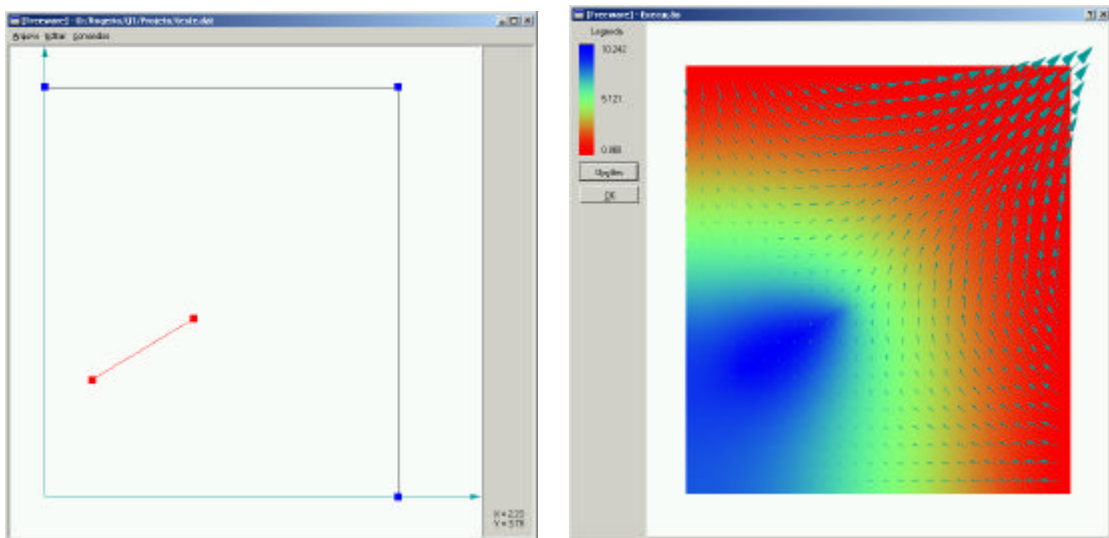


Figura 1 – Representação de uma superfície bidimensional com uma fonte linear de corrente.

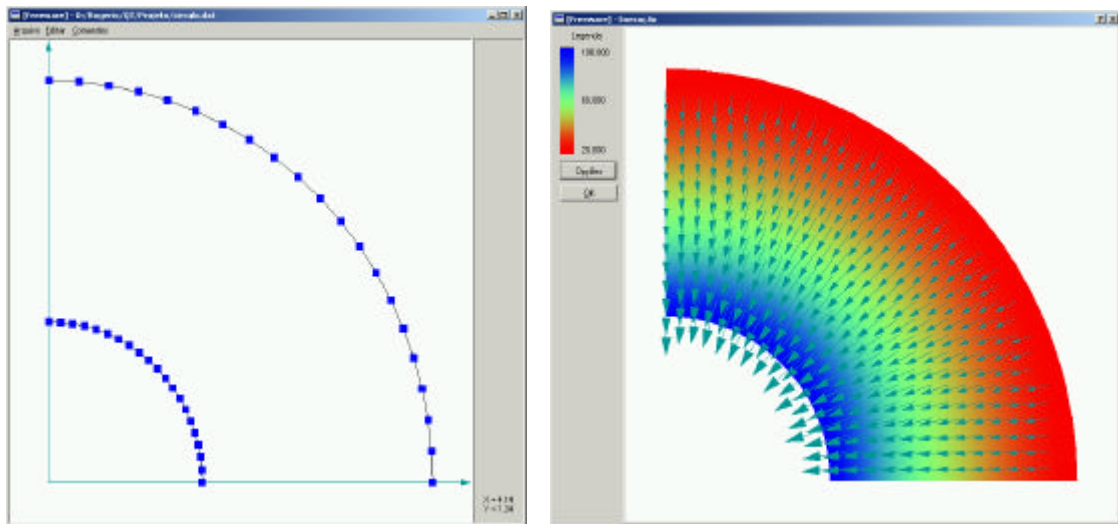


Figura 2 – Representação de uma superfície bidimensional, sem fontes de corrente.

### 3.2. Problemas tridimensionais

A versão tridimensional do programa apresenta diversos elementos que podem ser aplicados na modelagem da estruturas como, por exemplo, elementos tubulares, triangulares planos, triangulares cilíndricos, esféricos, circulares planos e quadrangulares cilíndricos. Após a geração da malha que representa o sistema, as condições de contorno devem ser aplicadas de forma a representar, da melhor forma possível, o problema sob análise.

Como exemplo da aplicação da técnica em problemas tridimensionais, apresentam-se os resultados da simulação numérica de um navio plataforma. A Figura 3 mostra a distribuição de potencial no casco do navio sem qualquer revestimento protetor. A simulação também pode representar o revestimento protetor mediante alterações nos valores de corrente na própria curva de polarização. Neste caso, a distribuição de potencial se daria de forma bastante homogênea em toda a superfície.

Nesta simulação, o casco do navio foi representado por elementos triangulares (vide parte interna do navio) e os anodos representados por fontes pontuais. As localizações dos anodos de corrente impressa, num total de oito, podem ser visualizadas na figura. Embora estas áreas apresentem potenciais muito negativos, o que indicaria superproteção do casco do navio, este fato não compromete a integridade da estrutura, visto que é prática comum a colocação de um material isolante nas regiões que circundam os anodos.

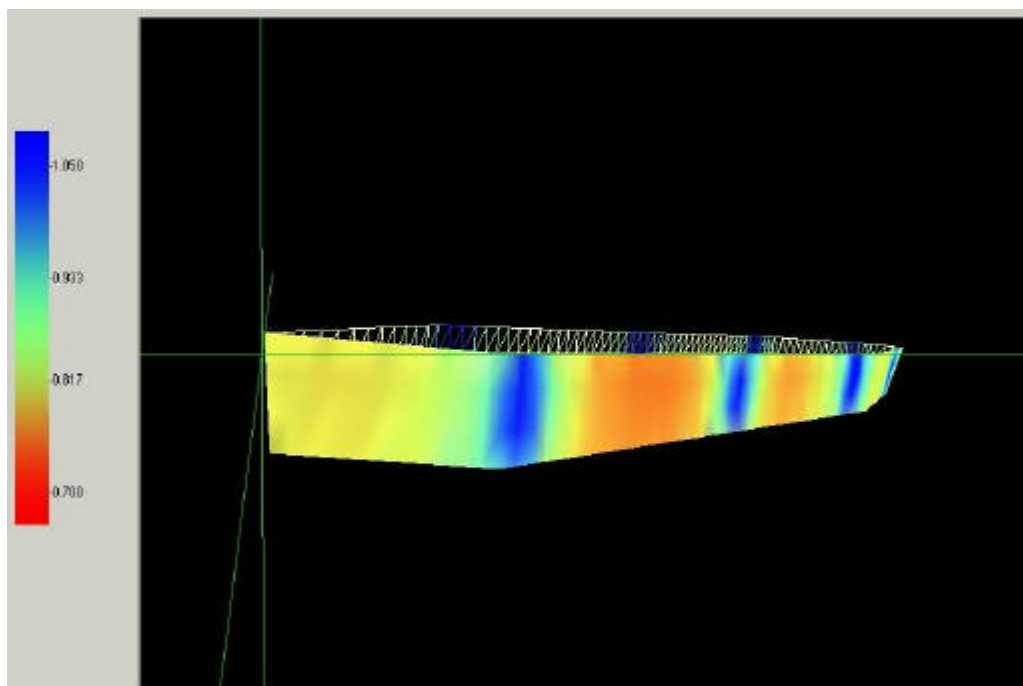


Figura 3 – Distribuição de potencial no casco de um navio plataforma.

#### 4. Conclusões

Técnicas numéricas se apresentam como uma poderosa ferramenta na avaliação de sistemas de proteção catódica, permitindo dimensionar de forma criteriosa os parâmetros básicos de projeto.

Simulações bidimensionais, axissimétricas ou tridimensionais podem ser executadas, obtendo-se, em forma gráfica, a distribuição de potencial na superfície metálica. A manutenção da toda a superfície no potencial mínimo estabelecido como critério de proteção catódica, assegura a integridade de estruturas enterradas e submersas.

#### 5. Referências

- [1] PER OLAV GARTLAND, “Computer Modelling of Offshore CP Systems for 15 years: What have we learned?”, Corrosion 99, Research Topical Symposium, Texas, 1999.
- [2] BLARICUM,V.V., KUMAR,A., Corrosion 92, paper 374, 1992.
- [3] MUNN,R.S., Corrosion 84, paper49, 1984.
- [4] ZAMANI,N.G., CHUANG,J.M., PORTER,J.F., The Journal for Numerical Methods in Engineering, vol24, p 605-620, 1987.
- [5] BREBBIA,C.A., TELLES,J.C.F., WROBEL,L.C., “Boundary Element Techniques: Theory and Applications in Engineering”, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [6] S.L.D.C.BRASIL, J.C.F.TELLES, L.R.M. MIRANDA “On the Effect of Some Critical Parameters in Cathodic Protection Systems: A Numerical/Experimental Study”, Computer Modeling in Corrosion, ASTM STP 1154, R.S. Munn Ed., American Society for Testing and Materials, p. 277- 291, 1992, Philadelphia, Estados Unidos.
- [7] MÄNTYLÄ, M., 1988, An Introduction to Solid Modeling, 1 ed, New York, Computer Science Press.