

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

SUBSÍDIOS PARA ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA EM EQUIPAMENTOS SUBMARINOS NO CONTEXTO DE GÊMEOS DIGITAIS

AUTORES:

Tiago Antônio de Queiroz Yunes, Suélen Seledes Rodrigues, Miguel Burg Demay

INSTITUIÇÃO:

Centro de Metrologia e Instrumentação, Fundação Certi

SUBSÍDIOS PARA ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA EM EQUIPAMENTOS SUBMARINOS NO CONTEXTO DE GÊMEOS DIGITAIS

Resumo

Ativos submarinos para a produção de petróleo e gás natural possuem estrutura composta por ligas metálicas, que, em contato com a água do mar, estão sujeitas à corrosão eletroquímica e, consequentemente, à perda gradual de sua integridade. Para mitigar o processo de corrosão em equipamentos submarinos, sistemas de proteção catódica baseados em anodos de sacrifício são amplamente utilizados. A vida útil prevista aos anodos pode ser afetada por dois principais modos de falha: o consumo excessivo e a passivação. Assim, inspeções regulares são relevantes para identificar tais falhas precocemente, e não comprometer a proteção dos ativos submarinos. A dificuldade e o alto custo de manutenção e inspeção oriundos da exploração em águas ultraprofundas motivam o uso de sistemas de monitoramento por meio de gêmeos digitais (*digital twins*). O presente artigo discorre sobre a importância do monitoramento dos anodos de sacrifício e traz um comparativo entre as diferentes técnicas de inspeção disponíveis comercialmente. Ainda, discute-se sobre a implementação de um gêmeo digital para monitoramento da integridade de ativos submarinos referente ao desgaste por corrosão externa, bem como sobre aspectos associados à sua viabilidade e aplicabilidade.

Palavras-chave: gestão da integridade, técnicas de monitoramento e inspeção, anodos de sacrifício, gêmeos digitais.

Abstract

Subsea assets for oil and natural gas production have metallic alloy structures, which are subjected to electrochemical corrosion and, therefore, to gradual integrity loss when in contact with seawater. In order to mitigate the corrosion process in subsea equipment, cathodic protection systems based on sacrificial anodes are widely employed. Anodes forecasted lifecycle can be mainly affected by two failure modes: excessive consumption and passivation. Hence, regular inspections are relevant to early identification of failures and assurance of subsea assets cathodic protection. Difficulty and high cost of maintenance and inspection from ultra-deep water exploration motivate the use of monitoring systems through digital twins. The present paper discusses the importance of sacrificial anodes monitoring and brings a comparative between different inspection techniques commercially available. Furthermore, the implementation of a digital twin for monitoring the integrity of subsea assets related to external corrosion degradation is also addressed, as well as its feasibility and applicability aspects.

Keywords: integrity management, monitoring and inspection methods, sacrificial anodes, digital twins.

Introdução

Na indústria de petróleo e gás, ligas metálicas são empregadas para resistir às condições externas e prolongar a vida útil de equipamentos e dutos no ambiente submarino. Entretanto, a presença de íons dissolvidos confere à água do mar uma elevada condutividade elétrica, caracterizando-a como um eletrólito. Essa conjuntura, que envolve ligas de metais em contato com a água do mar, propicia a ocorrência da corrosão eletroquímica.

A corrosão eletroquímica é um fenômeno complexo, que envolve reações químicas entre o metal, a presença de eletrólitos e o ambiente circundante. É uma das principais causas de falha de ativos submarinos, uma vez que contribui para o desgaste progressivo dos mesmos. Assim, a corrosão eletroquímica provoca uma perda gradual da integridade estrutural de tais equipamentos e dutos (YARO et al., 2013).

Para mitigar a corrosão em equipamentos submarinos, estratégias como revestimentos anticorrosivos, utilização de ligas resistentes à corrosão, proteção catódica e monitoramento são empregadas para identificar e corrigir potenciais problemas. Entre elas, sistemas de proteção catódica (GACP - *Galvanic Anode Cathodic Protection*) destacam-se pela menor necessidade de inspeção e manutenção, garantindo controle confiável da corrosão ao longo da vida útil do projeto (DNV, 2021a).

Sistemas de proteção catódica são baseados em anodos de sacrifício. Ao serem posicionados estrategicamente, os anodos tornam-se os materiais preferenciais para o processo de corrosão, preservando os equipamentos essenciais e estendendo a vida útil deles. Assim, o ativo submarino estará protegido das ações da corrosão eletroquímica enquanto os anodos associados não tiverem sido suficientemente consumidos.

Em relação à integridade de sistemas de proteção catódica de ativos submarinos, dois modos de falha merecem atenção especial: o consumo excessivo e a passivação do anodo. O consumo excessivo ocorre quando a taxa de desgaste do anodo ultrapassa os limites aceitáveis, comprometendo a eficácia do sistema e expondo os equipamentos à corrosão. Por outro lado, a passivação do anodo refere-se ao fenômeno em que o caminho elétrico entre o anodo e o catodo é interrompido, impedindo o anodo de realizar a sua função.

O projeto de sistemas de proteção catódica prevê uma determinada vida útil aos anodos. Porém, a taxa de consumo do anodo varia conforme as condições do ambiente marinho, sendo influenciada por fatores como salinidade, temperatura, composição química da água e presença de micro-organismos. Isso, somado à dificuldade e ao alto custo de manutenção e inspeção oriundos da exploração em águas ultraprofundas, motiva o uso de sistemas de monitoramento por meio de gêmeos digitais.

O presente artigo tem como objetivo levantar subsídios para análise da integridade de sistemas de proteção catódica em equipamentos submarinos por meio de gêmeos digitais. Nesse sentido, foi feito um comparativo dos métodos de inspeção e monitoramento comercialmente disponíveis. Posteriormente, foram avaliadas tanto a viabilidade técnica quanto a necessidade e relevância da utilização de gêmeos digitais para uma análise voltada a aspectos de integridade de equipamentos submarinos cobertos por um sistema de proteção catódica.

Metodologia

Um gêmeo digital, do inglês *digital twin* (DT), pode ser definido como a representação digital de um sistema ou ativo, que calcula os estados e fornece informações relevantes por meio de modelos integrados e dados, para dar suporte a decisões ao longo do ciclo de vida do ativo em questão. Na indústria de óleo e gás, gêmeos digitais podem ser aplicados como sistemas de apoio à gestão da integridade de ativos submarinos, sendo estruturados por meio de elementos funcionais, tais como, a Inspeção Baseada em Risco (IBR) e a estimativa de vida remanescente (RODRIGUES *et al.*, 2023).

A corrosão é um mecanismo de degradação e seu modelo matemático pode entrar como um elemento funcional no DT. A eficiência do sistema de proteção catódica depende da sua capacidade de manutenção do potencial elétrico. A Tabela 1 apresenta os limites de tal parâmetro (DNV, 2021b).

Tabela 1 – Limites de tolerância para o potencial elétrico para garantia da proteção catódica (DNV, 2021b).

Material		Potencial de proteção negativo mínimo [V] (ref. eletrodo de Ag/AgCl)	Potencial de proteção negativo máximo [V] (ref. eletrodo de Ag/AgCl)
Aço carbono/ aço de baixa liga	Meio aeróbico	- 0,80	-1,10
	Meio anaeróbico	-0,90	-1,10
Aço INOX/ Aço austenítico	PREN ≥ 40	-0,30	<i>Não apresentado pela norma</i>
	PREN < 40	-0,60	Sem limite
	Duplex	-0,60	Sem limite

O projeto do sistema de proteção catódica demanda o dimensionamento de algumas grandezas relevantes, como a corrente fornecida pelos anodos para atender a demanda da transferência de elétrons entre anodo e catodo e garantir o atendimento aos critérios de potencial elétrico apresentados na Tabela 1. A corrente fornecida pode ser determinada de acordo com a equação 1 (DNV, 2021c).

$$I_c = I_a N = \frac{N(E_c^0 - E_a^0)}{R_a} \quad (1)$$

Onde,

- I_c : corrente recebida pelo catodo, definida por projeto [A];
- I_a : corrente fornecida por cada anodo do sistema de proteção catódica [A];
- N : número de anodos do sistema de proteção catódica [] ;
- E_c^0 : potencial elétrico definido por projeto para proteção catódica [V];
- E_a^0 : potencial elétrico definido por projeto para cada anodo [V];
- R_a : resistência elétrica do sistema de proteção catódica [Ω].

Assim, conforme o anodo se degrada e perde volume, sua resistência diminui e, consequentemente, o potencial catódico é reduzido.

Considerando que, para um determinado anodo, o potencial atinge o limite mínimo requerido para proteção catódica quando o volume do anodo decresce pela metade do inicial, é possível determinar um parâmetro de integridade do anodo de sacrifício, I_{AS} , calculado pela equação 2.

$$I_{AS}(t_{op}) = \frac{V(t_{op})}{V_0} \quad (2)$$

Sendo:

- I_{AS} : parâmetro de integridade do anodo de sacrificio [];
- t_{op} : tempo de operação [anos];
- $V(t_{op})$: volume do anodo em função do tempo de operação [m^3];
- V_0 : volume inicial do anodo [m^3].

Considerando que a degradação do volume em função do tempo de operação segue uma tendência quadrática, onde α é uma constante baseada no tempo de vida projetado para o anodo, pode-se definir tal valor conforme a equação 3. Com isso, obtém-se a equação 4. Assim, define-se o parâmetro I_{AS} variando de 0 a 1, em que o limite de proteção catódica é 0,5; abaixo desse valor, a estrutura metálica fica desprotegida.

$$V(t_{op}) = V_0 - \alpha t_{op}^2 \quad (3)$$

$$I_{AS}(t_{op}) = 1 - \frac{\alpha t_{op}^2}{V_0} \quad (4)$$

Dessa forma, é possível construir um DT para análise da integridade da proteção catódica de ativos submarinos decorrente da avaliação de vida útil dos anodos de sacrificio associados e seu mecanismo de degradação. Esse mecanismo de degradação pode ser modelado, inspecionado e monitorado. Tudo isso pode ser gerido no DT; logo, é importante conhecer as técnicas de monitoramento e inspeção, permitindo a compreensão de como elas podem fornecer dados de entrada para o DT, e de quais as técnicas mais vantajosas nesse sentido. Desse modo, as principais alternativas disponíveis comercialmente para inspeção de proteção catódica podem ser identificadas a partir de pesquisas de mercado e revisão de normas técnicas. Tais alternativas se baseiam em três princípios de medição distintos: medição de potencial elétrico, de gradiente de campo elétrico e por visão computacional. Para cada sistema de inspeção, são elencadas as respectivas vantagens e desvantagens, bem como aspectos técnicos importantes para que as técnicas sejam escolhidas e aplicadas.

Resultados e Discussão

A integridade dos ativos submarinos em relação à corrosão externa é função da integridade dos anodos de sacrificio. Assim, a realização de inspeções para avaliar seu estado de degradação é fundamental para a gestão da integridade de ativos submarinos.

Uma grande vantagem dos sistemas de proteção catódica por anodos de sacrificio é a baixa demanda por atividades de inspeção e manutenção, para garantir um controle confiável da corrosão durante a sua vida útil. Entretanto, com o aumento da vida útil das estruturas *offshore*, a necessidade de inspeções tende a aumentar (DNV, 2021a).

Para a execução de inspeções, normalmente são utilizadas medições de potencial elétrico e inspeções visuais. Outras técnicas podem ser empregadas, como medições de gradientes de campo elétrico em anodos para avaliações da saída de corrente de anodos individuais (DNV, 2021a).

- Medição do Potencial Catódico

A medição de potencial catódico é realizada por meio da medição da diferença de potencial elétrico entre a estrutura de interesse e um eletrodo de referência; comumente, uma célula de prata e cloreto de prata (Ag/AgCl). Quando esse par é exposto à água do mar, é produzida uma tensão elétrica estável e bem conhecida; por isso seu uso como eletrodo de referência.

Entre as soluções comerciais para medição de potencial elétrico disponíveis para águas profundas, cita-se o POLATRAK DEEP C METER 3000, composto por uma sonda, onde está presente o eletrodo de referência; e um sistema de visão computacional, para posicionamento da sonda.

A medição de potencial elétrico apresenta uma elevada confiabilidade metrológica, mesmo em águas profundas, com exatidão de ± 5 mV. Contudo, outras fontes de incerteza existem, e devem ainda ser consideradas (DEEPWATER, 2024b). Além disso, por tratar-se de uma medição por contato, pontual, a quantidade de pontos medidos é limitada pelo tempo e custo do processo de inspeção, e depende do acesso e posicionamento da sonda no ativo por parte do ROV (DEEPWATER, 2024a).

Alternativa para otimizar a quantidade de pontos adquiridos e o tempo de inspeção é a medição sem contato, por meio do gradiente de campo elétrico e visão computacional.

- Medição de Gradiente de Campo Elétrico

O campo elétrico formado entre o catodo e o anodo se propaga pelo meio em torno de ambos os eletrodos (anodo-equipamento), de modo que pode ser medido por sensores presentes em ROVs e AUVs. A medição do gradiente de campo elétrico permite a determinação da corrente fornecida pelo anodo, que pode ser associada à integridade do sistema de proteção catódica.

Para esse princípio de medição, dois fabricantes foram identificados: OFG e Force Technology. O sistema de medição OFG ICP baseia-se no uso de AUVs para medir o gradiente de campo elétrico em torno de anodos instalados em ativos submarinos (WEITEMEYER *et al.*, 2020). A partir de tal medição, é possível calcular a corrente fornecida por cada anodo, estimar seu consumo ao longo do tempo e sua vida útil remanescente, em comparação com os requisitos de projeto.

O fabricante promete um limite de detecção de 10 η V/cm. Todavia, há outras fontes de incerteza, como calibrações e variações do ambiente, que podem levar a incerteza instrumental do sistema a valores maiores do que os obtidos por meio da medição de potencial elétrico.

Outro fornecedor, a Force Technology, possui um sensor de gradiente de campo que pode ser acoplado a ROVs ou AUVs para monitoramento do sistema de proteção catódica. Tal sensor apresenta um limite de detecção de 100 η V/cm (FORCE TECHNOLOGY, 2024).

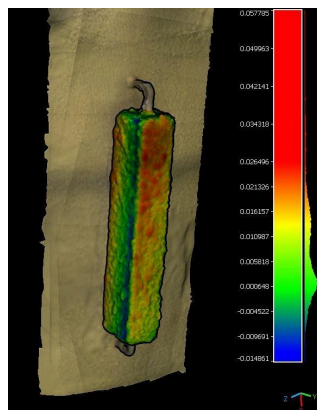
- Medição por Visão Computacional

O uso de sistemas de medição por visão computacional vem crescendo junto ao amadurecimento da tecnologia. Para os sistemas de produção submarinos, a ausência de camadas de óxido de ferro nas superfícies metálicas pode indicar a eficácia do sistema de proteção catódica.

Ainda, anodos que tenham se consumido pouco ou demais frente ao esperado podem indicar falhas, como passivação ou degradação excessiva. Nesse sentido, existem soluções de sistemas de visão convencionais, para monitoramento visual, capazes de serem utilizados a grandes profundidades.

Para medições de maior exatidão, há sistemas comerciais para escaneamento laser e medição 3D, que podem ser empregados para determinar as dimensões do anodo e, conseqüentemente, estimar a sua massa restante. É o caso do sistema Discovery, da empresa VOYIS, capaz de gerar imagens tridimensionais de anodos.

Figura 1 – Medição 3D da superfície de um anodo submerso (VOYIS, 2024).



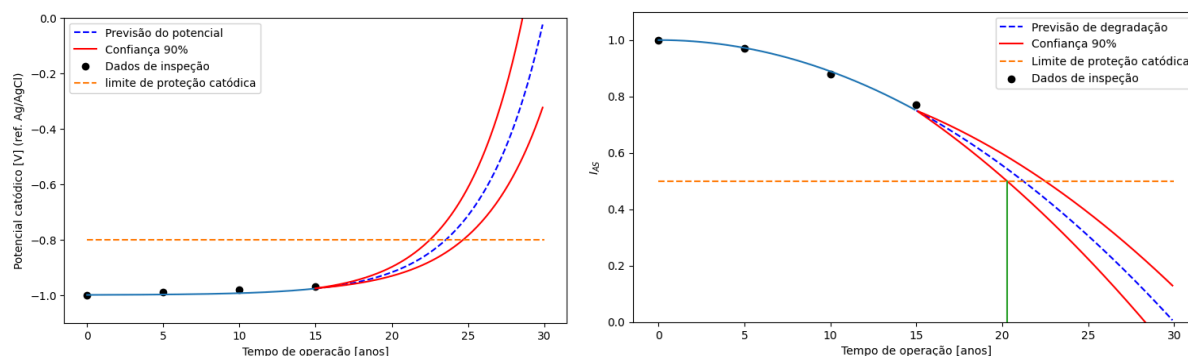
Tal sistema possui capacidade de captura de imagens de alta resolução e modelagem 3D, com exatidão de até 2 mm, avaliada em águas claras. Considera-se que tal valor tende a aumentar em operação, devido às condições da água do mar e à distância entre o sensor e o anodo. Ainda, tal sistema de medição somente é capaz de medir o volume de anodos acessíveis (VOYIS, 2024).

- Gêmeos Digitais

O desenvolvimento de um gêmeo digital demanda uma complexa modelagem, condicionamento de dados e programação de software pertinente. Para o monitoramento do sistema de proteção catódica, é recomendável a geração de gráficos, que mostrem o comportamento de uma ou mais variáveis de interesse, como o potencial elétrico, a corrente do anodo de sacrifício ou o seu volume, ao longo do tempo.

A Figura 2 apresenta resultados de estudo de caso gerado com valores estimados de como seria o gráfico de análise de um parâmetro de integridade I_{AS} , fornecido pelo gêmeo digital associado ao equipamento de interesse. Neste exemplo, tal parâmetro foi definido a partir da variação do volume do anodo com o tempo, logo as inspeções seriam feitas com um sistema de medição por visão computacional, como o Discovery, da empresa VOYIS.

Figura 2 – Gráficos de parâmetros de integridade de um anodo de sacrifício ao longo de seu ciclo de vida.



Na Figura 2, observa-se a degradação do anodo em função do tempo de operação. A partir dos dados de inspeções realizadas periodicamente, é possível realizar uma regressão e determinar a constante α do modelo de integridade definido neste DT. Assim, gera-se uma previsão da degradação futura com um nível de confiança de 90%, baseado nas incertezas associadas ao modelo.

Para estimar a vida remanescente do anodo, verifica-se o ponto em que o intervalo de predição atinge o limite de proteção catódica. A linha verde indica o período de 20,3 anos de operação. Considerando que a última inspeção foi realizada em 15 anos de operação, estima-se uma vida remanescente de 5,3 anos para o anodo em questão. Estimado o tempo de vida remanescente, pode-se planejar melhor a próxima inspeção ou manutenção.

Quanto à viabilidade da utilização de DT para monitoramento de anodos, os estudos de Rocha *et al.* (2024) revelaram que em águas profundas, com a redução da temperatura e o aumento da pressão, o potencial catódico para que o aço carbono fique protegido do processo corrosivo é reduzido em relação a águas mais rasas. Além disso, foi feita uma extensa análise de destroços metálicos de navios naufragados com e sem proteção catódica, sem apresentar grandes diferenças no comportamento da corrosão e na integridade das estruturas. Isso indica que a taxa de corrosão do aço carbono em águas profundas é reduzida.

Assim, os efeitos da corrosão externa em ativos submarinos tendem diminuir em águas profundas, o que reduz a relevância de sistemas de DT para monitoramento da integridade de equipamentos submarinos quanto a sua proteção catódica no leito marinho. Dessa forma, a proteção catódica é mais importante em águas rasas do que em profundas.

Entretanto, embora a exploração de óleo e gás em águas rasas esteja se reduzindo com o tempo, a expansão da produção eólica *offshore* tende a justificar o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento da integridade de ativos submarinos por meio de gêmeos digitais para avaliação da proteção catódica por anodos de sacrifício.

Conclusões

Este estudo teve como objetivo explorar subsídios para análise de integridade de sistemas de proteção catódica em equipamentos submarinos por meio de gêmeos digitais. Inicialmente, foi realizado um levantamento das alternativas para inspeção dos anodos de sacrifício. Verificou-se que a medição do potencial elétrico é a alternativa mais confiável, mas possui a necessidade de contato. As técnicas de medição sem contato avaliadas, a medição do gradiente de campo elétrico e os sistemas de visão computacional, apresentam ainda questões acerca de sua incerteza instrumental em operação.

Ainda, por meio de uma modelagem simplificada, baseada em equações de projeto de proteção catódica, foi mostrado que um DT seria tecnicamente viável dentro do contexto abordado. No entanto, estudos recentes sugerem que a taxa de corrosão é reduzida em águas profundas, e em águas rasas as inspeções são menos dispendiosas; o que pode reduzir a viabilidade de sua implementação. Entretanto, existe a necessidade de realizar estudos mais aprofundados, para promover um maior embasamento na tomada de decisões relacionadas ao tema deste trabalho. Além disso, com a expansão da produção eólica *offshore*, o tema torna-se altamente relevante para a garantia da integridade de ativos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Certi pela oportunidade e incentivo à elaboração do presente estudo.

Referências Bibliográficas

BUHR, B., RAUN, L. P. L., Sørensen, R. E., Rezania, Y., & Diederichs, A. M. Benefits of Continuous Corrosion Monitoring for Offshore Wind Structures. **AMPP CORROSION**, 2023.

CLAUS, B; KOWALCZYK, M.; DONALD, C. AUV iCP Test Results from a Cathodic Protection Survey of a North Sea Pipeline, 2018.

DEEPWATER. **Polatrak® deep c meter 3000™ and 3000 ad™ roV cathodic-protection survey systems.** <https://stoprust.com/media/2371/deep-c-meter-3000-overview-ltr.pdf>. Acesso em 15/04/2024a.

DEEPWATER. **Polatrak Deep C Meter™ 3000: Technical datasheet.** <https://stoprust.com/media/2419/deep-c-meter-3000-techdata-ltr.pdf>. Acesso em 24/04/2024b.

DNV, **Cathodic protection design.** DNV-RP-B401 (2021a).

DNV. **Corrosion protection of floating production and storage units.** DNV-RP-B101 (2021b).

DNV. **Risk based corrosion management.** DNV-RP-C302 (2021c).

FORCE TECHNOLOGY. **FiGS CP survey explained.** <https://www.youtube.com/watch?v=e3HU6DEC7q0>. Acesso em 15/04/2024.

OLESEN, A. J., Nielsen, L. V., Hilbert, L. R., & Fontenay, F. Design and Implementation of an Offshore Remote Monitoring System for Corrosion, Coating and Cathodic Protection Performance. **AMPP CORROSION**, 2023.

ROCHA, M. S. et al. **A New Concept of Corrosion Protection and Integrity of Subsea System in Brazil.** In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. 2024.

RODRIGUES, S. S. et al. **Digital Twin of Subsea Assets as a Tool for Integrity Management and Risk-Based Inspection: Challenges and Perspectives.** In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. 2023.

VOYIS. **Discovery Vision System.** <https://voyis.com/discovery-vision-system/> Acesso em 16/04/2024.

WEITEMEYER, K; CLAUS, B; KOWALCZYK, P.; BLOOMER, S; KOWALCZYK, M. Autonomous Underwater Vehicle based Electric and Magnetic Field measurements applied to Geophysical Surveying and Subsea Structure Inspection, 2020.

YARO, A. S.; HAMEED, K. W.; KHADOM, A. A. Study for prevention of steel corrosion by sacrificial anode cathodic protection. Theoretical foundations of chemical engineering, v. 47, n. 3, p. 266-273, 2013.