

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Revitalização de Sistemas de Proteção Catódica Instalados em Plataformas Marítimas Fixas de Produção de Óleo & Gás

Renato de Mello Brandão Horta^a, Edson Góis de Medeiros^b,
Álvaro Antônio Terra Martins da Silva^c, Rodrigo Leite Quaresma^d.

Abstract

The activity of exploration and production of oil and gas offshore uses different types of platforms among these the fixed type over jacket usually belongs to the projects of the oldest producing fields (mature), and exist in very large number in Brazil. In the Campos Basin there are 13 fixed platforms that are positioned in water depths between 80 and 170 meters with uptime over 20 years. Fixed platforms adopt as corrosion protection design a paint scheme based epoxy paint to splash zone, salt spray and constant splashes, and to permanently submerged stretch uses the technique of Cathodic Protection System usually scaled with galvanic anodes installed along the jacket structure. In submerged stretch is not applied paint scheme for technical and economic reasons. This paper will address the steps provided for monitoring Cathodic Protection System over the useful life, show the opportune moment to reassess the effectiveness of the installed protection and the beginning of the revitalization of the Cathodic Protection System maritime unit project, also presented alternative designs of systems already installed on platforms abroad since installations of this size require special attention with regard to the integrity especially when want extend the life time.

Keywords: Cathodic protection, retrofit, fixed platform, impressed current.

Resumo

A atividade de exploração e produção de óleo e gás no mar utiliza diversos tipos de plataformas, sendo que as do tipo fixas sobre jaqueta são normalmente pertencentes à projetos de campos de produção mais antigos (maduros), e existem em número bastante expressivo no Brasil. Na Bacia de Campos existem 13 plataformas fixas que estão posicionadas em lâminas d'água variando entre 80 m e 170 m com tempo em operação acima de 20 anos. As plataformas fixas adotam como projeto de proteção anticorrosiva um esquema de pintura à base de tinta epóxi para o trecho sujeito à variação de maré, névoa salina e respingos constantes; e para o trecho permanentemente submerso emprega a técnica de Proteção Catódica, sistema normalmente dimensionado com anodos galvânicos instalados ao longo da estrutura da jaqueta. No trecho submerso não é aplicado esquema de pintura por razões técnico-econômicas. O presente trabalho irá abordar as etapas previstas de acompanhamento do SPC ao longo da vida útil, mostrar o momento oportuno para uma reavaliação da

^aEngenheiro de Equipamentos Pleno – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

^bMestre, Engenheiro de Equipamentos Sênior – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

^cEngenheiro de Petróleo Sênior – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

^dEstagiário de Engenharia – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

efetividade da proteção instalada, e início do projeto de revitalização do SPC da unidade marítima, apresentando também alternativas de projetos de sistemas já instalados em plataformas no exterior, já que instalações desse porte requerem atenção especial com relação à integridade especialmente quando se pretende estender a vida útil.

Palavras-chave: Proteção catódica, revitalização, plataforma fixa, corrente impressa.

1. Introdução

A Bacia de Campos possui diversas unidades marítimas de produção de óleo e gás. Dentre elas, as que possuem maior tempo em operação são as plataformas fixas, com tempo superior a 20 anos. No projeto e construção destas unidades, o sistema de proteção anticorrosiva aplicado foi dimensionado para uma vida útil de aproximadamente 30 anos, sendo o tempo máximo previsto de produção do campo e de operação da plataforma, respeitando-se as inspeções e, quando necessárias, as devidas manutenções. Com o advento das tecnologias, o que possibilita a extensão da vida útil dos reservatórios visando a otimização na extração do óleo por estas plataformas, tornou-se necessário iniciar o processo de revitalização das unidades de produção, com o objetivo de se preservar a integridade das mesmas além do escopo do projeto inicial.

Para a garantia da proteção contra corrosão da plataforma na região submersa, composta por uma grande e complexa estrutura metálica denominada jaqueta (parte estrutural de uma plataforma fixa que vai desde a fundação até pouco acima do nível do mar e sobre a qual são instalados o convés e/ou módulos), faz-se necessário a instalação de sistemas específicos projetados para tal finalidade. Os sistemas de proteção anticorrosiva para jaquetas são compostos normalmente por esquema de pintura/revestimento na região emersa e na zona de variação de maré (ZVM), sendo a parte imersa protegida por meio de anodos galvânicos ou de sacrifício (proteção catódica por corrente galvânica). Devido a necessidade estratégica e econômica de extensão da vida útil das unidades, foi necessário buscar soluções de projeto, e principalmente instalação, para a revitalização dos Sistemas de Proteção Catódica (SPC) existentes, considerando-se novos cenários comerciais associados ao aumento da curva de produção.

Foi pensando nisso que a PETROBRAS iniciou há alguns anos o desenvolvimento de projetos para revitalização, na locação, dos sistemas de proteção catódica de suas unidades fixas. Para isso, contou com o apoio de fabricantes e prestadores de serviços nessa área, de forma a viabilizar as melhores soluções tecnológicas disponíveis no mercado até o momento. No decorrer deste trabalho serão apresentados dois tipos de sistemas de proteção catódica para jaquetas de plataformas fixas: um sistema onde os anodos são dispostos em *skids* no leito marinho ao redor da jaqueta, e outro onde os anodos são fixados em tirantes ao longo da profundidade da jaqueta.

2. Desenvolvimento

2.1 Plataformas fixas

A partir do final da década de 70 foram feitas importantes descobertas no setor de óleo e gás na costa brasileira. Na Bacia de Campos, em especial, foram encontrados os reservatórios com os maiores potenciais de produção. Devido ao fato dos campos de petróleo localizarem-se em águas consideradas rasas, optou-se pelo desenvolvimento de projetos de plataformas fixas sobre jaquetas. Entre as décadas de 70 e 80, foi projetada e construída a maior parte das plataformas fixas existentes até o momento, como pode ser visualizado nas figuras 1 e 2. A PETROBRAS, na sua Unidade de Operações da Bacia de Campos, possui 33 plataformas com área metálica submersa superior a 1.200.000 m², sendo desse total 780.000 m² relativos às fixas. Estas plataformas possuem posicionamento estratégico no processamento e escoamento da produção de toda a Bacia de Campos, por isso, nesse ambiente é indispensável a prevenção constante e eficaz dessas estruturas contra a corrosão eletroquímica pela água do mar (1).



Figura 1 – Plataforma fixa de produção localizada na Bacia de Campos – trecho emerso (topside)

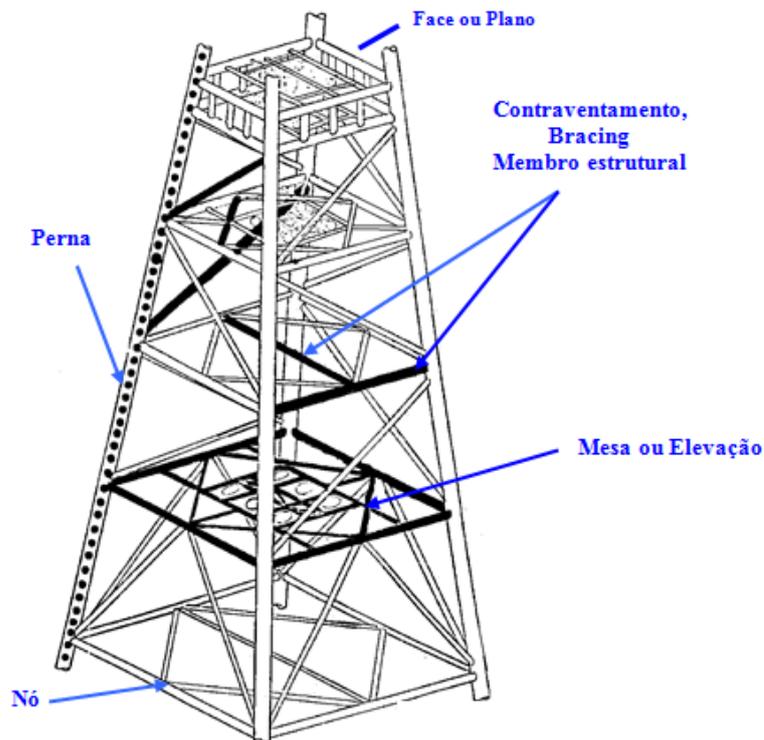


Figura 2 – Estrutura metálica da jaqueta de plataforma fixa com seus elementos principais – trecho submerso

2.2 Sistema de proteção catódica (SPC)

2.2.1 Conceituação da técnica

Esta técnica de combate à corrosão consiste em transformar a estrutura metálica a ser protegida no catodo de uma pilha eletroquímica ou eletrolítica, atuando nos potenciais da estrutura. Existem quatro elementos indispensáveis para o funcionamento deste sistema, são eles: catodo, que consiste na estrutura metálica protegida contra a corrosão; anodo, que é o elemento metálico que sofre o desgaste ou deterioração para garantir a proteção do catodo; eletrólito, que é o meio condutor para transferência iônica; e a interligação metálica que consiste no meio condutor para a transferência de elétrons entre o catodo e o anodo. A ausência de qualquer um destes elementos faz com que o SPC deixe de funcionar. É um método eletroquímico de proteção contra a corrosão e utiliza uma corrente de circulação contínua entre os eletrodos (anodo/catodo). Esta corrente altera os valores de potencial do metal a ser protegido reduzindo, assim, sua taxa de corrosão para próximo de zero (região de imunização do material). Esta corrente pode ser obtida com o emprego de anodos galvânicos (anodos de sacrifício) ou utilizando-se um sistema por corrente impressa com anodos inertes (2).

Os revestimentos anticorrosivos e a proteção catódica estão intrinsecamente ligados. Quanto melhor o revestimento aplicado, quando o projeto da instalação também adota a proteção por barreira, mais baixo será o custo do SPC, pois a corrente demandada pelo sistema é para atuar nos pontos de falhas e regiões de deficiência do revestimento; e quanto pior a qualidade do revestimento, ou a ausência deste, maior será a demanda de corrente necessária para proteção

da estrutura metálica. Normalmente as jaquetas das plataformas fixas não são pintadas na parte submersa (somente da ZVM para cima) por razões, principalmente, econômicas.

2.2.2 Vantagens no uso da tecnologia

As vantagens na utilização da técnica de proteção catódica são elencadas a seguir:

- Proteção contra corrosão de instalações metálicas enterradas ou submersas, revestidas (melhor situação) ou não (situação mais desfavorável, requerendo maior demanda de corrente);
- Baixo custo de implantação se comparada ao custo total do projeto da estrutura a ser protegida (custo total do SPC entre 1% e 2% do custo total da estrutura a ser protegida), aliado aos benefícios oferecidos através da garantia permanente da integridade da instalação;
- Totalmente a favor do meio ambiente, pois com o devido controle da corrosão evita-se o vazamento de produtos agressivos e danosos aos solos, rios e mares, fauna e flora;
- Garante e prolonga a vida útil da estrutura a ser protegida pelo tempo que se desejar, fazendo-se o devido acompanhamento e manutenção do sistema ao longo do tempo, e realizando-se a restauração/substituição do mesmo ao final da sua vida útil;
- Possibilitou ao homem, ao longo dos anos, extrair e transportar diversos produtos (petróleo e seus derivados, álcool, gás, água, minério, etc) por longas distâncias através de dutos e embarcações, abrindo-se mão da utilização de materiais mais caros/nobres, utilizando-se materiais comerciais de menor custo como o aço carbono, material mais utilizado na área industrial.

2.2.3 Aplicações na área *offshore*

Além da proteção de jaquetas, o SPC tem grande aplicabilidade em toda a área *offshore*. Dentre as instalações que podem ser protegidas contra a corrosão por esta técnica, associadas normalmente com um esquema de pintura/revestimento, as principais são:

- Superfície interna de tanques de carga, lastro e *slop* (água oleosa);
- Superfície interna de equipamentos de processo (separadores de gás, tratadores de óleo e trocadores de calor);
- Superfície externa de equipamentos submarinos (árvores de natal molhada, *manifolds*, etc);
- Superfície externa do *turret* (*);
- Superfície externa de linhas de produção submersas (*risers*);
- Superfície externa de dutos de escoamento de gás ou óleo submersos;

- Superfície externa dos cascos das plataformas do tipo *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO), *Floating Production Storage* (FSO) e plataformas Semi-Submersíveis (SS).

(*) estrutura assimétrica ancorada ao leito marinho, que permite a rotação livre da embarcação em torno do eixo desta estrutura, proporcionando o alinhamento total da embarcação com as forças resultantes ambientais.

2.2.4 Tipos de Sistema de Proteção Catódica (SPC)

Existem dois métodos de aplicação de um sistema de proteção catódica: o método por corrente galvânica ou por anodos de sacrifício e o método por corrente impressa.

2.2.4.1 Corrente galvânica ou por anodos de sacrifício

A proteção catódica com anodos galvânicos é realizada por meio da dissimilaridade entre dois metais ou ligas metálicas, quanto ao potencial eletroquímico, onde o metal que atua como anodo é deteriorado para a proteção do metal que atua como catodo, por este motivo o elemento metálico que se degrada também é conhecido como anodo de sacrifício (3). A diferença de potencial entre eletrodos é relativamente pequena, sendo recomendável a meios onde a resistividade elétrica é da ordem de no máximo 6000 ohm.cm. O uso desse sistema em instalações marítimas é amplo, uma vez que a resistividade da água do mar é bastante baixa da ordem de 25 ohm.cm (2). A figura 3 ilustra o esquema de funcionamento do sistema de proteção catódica por corrente galvânica.

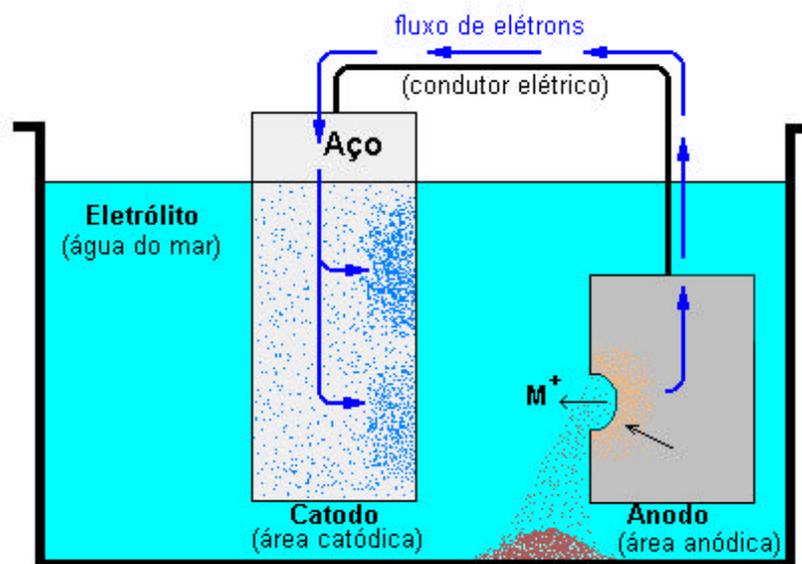


Figura 3 – Esquema do sistema de proteção catódica por corrente galvânica

Diferentes tipos de metais são usados como anodos, tais como ligas de magnésio, de zinco e de alumínio. O uso destes como material de sacrifício é devido a posição e eletronegatividade dos mesmos, na tabela de série galvânica, em relação ao aço carbono, material de uso comercial largamente utilizado nas plataformas (3). A proteção catódica galvânica é a mais

utilizada em jaquetas de plataformas como também em tubulações e dutos, equipamentos submarinos, equipamentos de superfície de processo (separadores de gás, tratadores de óleo, dessalgadoras, permutadores de calor), estruturas (*turret*), tanques de armazenamento, caixas de mar e cascos de unidades flutuantes.

Suas principais vantagens são:

- Não requerer suprimento de corrente;
- Baixo custo de manutenção;
- Praticamente elimina problemas de áreas sombreadas;
- Não oferece risco de superproteção, que poderia causar a fragilização do material catódico ou empolamento de revestimentos anticorrosivos pela formação exagerada de hidrogênio.

Suas desvantagens são:

- Alto custo de instalação para estruturas de grandes proporções, pelo fato do fornecimento de corrente de cada anodo ser limitado a valores baixos, acarretando a necessidade de fixação de grande número de anodos, incorrendo em diversos pontos de soldagem (2 por anodo x n° de anodos);
- Impossibilidade de aumento da injeção de corrente dos anodos.

2.2.4.2 Corrente impressa

Esta técnica requer uma fonte externa para gerar a força eletromotriz necessária que, por sua vez, drena a corrente contínua do sistema por meio do circuito eletroquímico formado. Na maioria dos casos são utilizados retificadores como fonte de energia (2). Como a diferença de potencial na saída da fonte é artificial, é possível fazer de maneira fácil correções e ajustes no sistema quando necessário. Comparativamente ao sistema galvânico, o sistema por corrente impressa possui custo de instalação bem inferior e tem a vantagem de ser ajustável. A figura 4 ilustra o esquema de funcionamento do sistema de proteção catódica por corrente impressa.

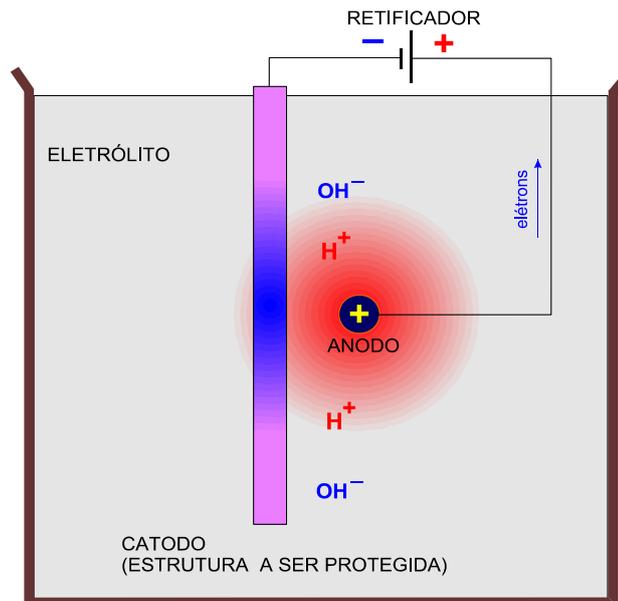


Figura 4 – Esquema do sistema de proteção catódica por corrente impressa

Suas principais vantagens são:

- Maior fornecimento de corrente por anodo, fazendo com que seja reduzido o número de pontos de injeção necessários em estruturas de grande porte, reduzindo-se assim o custo de instalação;
- Controle da quantidade de corrente fornecida por cada conjunto de injeção (retificador/anodos);
- Possibilidade de aplicação do sistema em meios de elevada resistividade elétrica.

O sistema de proteção catódica por corrente impressa vem sendo empregado nos projetos de revitalização de jaquetas, como será discutido mais à frente.

Suas desvantagens são:

- Necessidade de acompanhamento e manutenção periódica para checagem da integridade dos retificadores e seus componentes internos mecânicos e elétrico-eletrônicos, caixas de passagem, cabamentos elétricos de instrumentação dos eletrodos de referência permanentes e de potência dos anodos, como também dos próprios anodos;
- Dificuldade de proteção de áreas sombreadas. Neste método são utilizados poucos anodos onde cada um tem a função de proteger uma grande área, e caso estas áreas possuam reentrâncias ou geometria complexa, a proteção poderá ficar comprometida.

2.3 Histórico do uso de sistema de proteção catódica por anodos galvânicos em plataformas fixas (4)

O sistema originalmente instalado nestas unidades foi por corrente galvânica, através de anodos de sacrifício fixados por meio de soldagem ao longo de toda a extensão submersa da estrutura da jaqueta. As figuras 5 e 6 mostram o arranjo típico de anodos em uma jaqueta. Estima-se que foi instalado em cada plataforma, dependendo da profundidade e área a ser protegida, em torno de 200 a 1.700 anodos galvânicos. Mais alguns parâmetros adotados nos projetos são mostrados a seguir:

- Sistema de proteção catódica por corrente galvânica
 - Tipo de material do anodo: Liga de alumínio;
 - Área externa total submersa e submersa enterrada da jaqueta: 45.000 m² – 90.000 m²;
 - Massa bruta do anodo: 520 kg – 700 kg;
 - Massa líquida do anodo: 440 kg – 620 kg;
 - Corrente total de proteção catódica requerida: 4.800 A – 11.300 A.

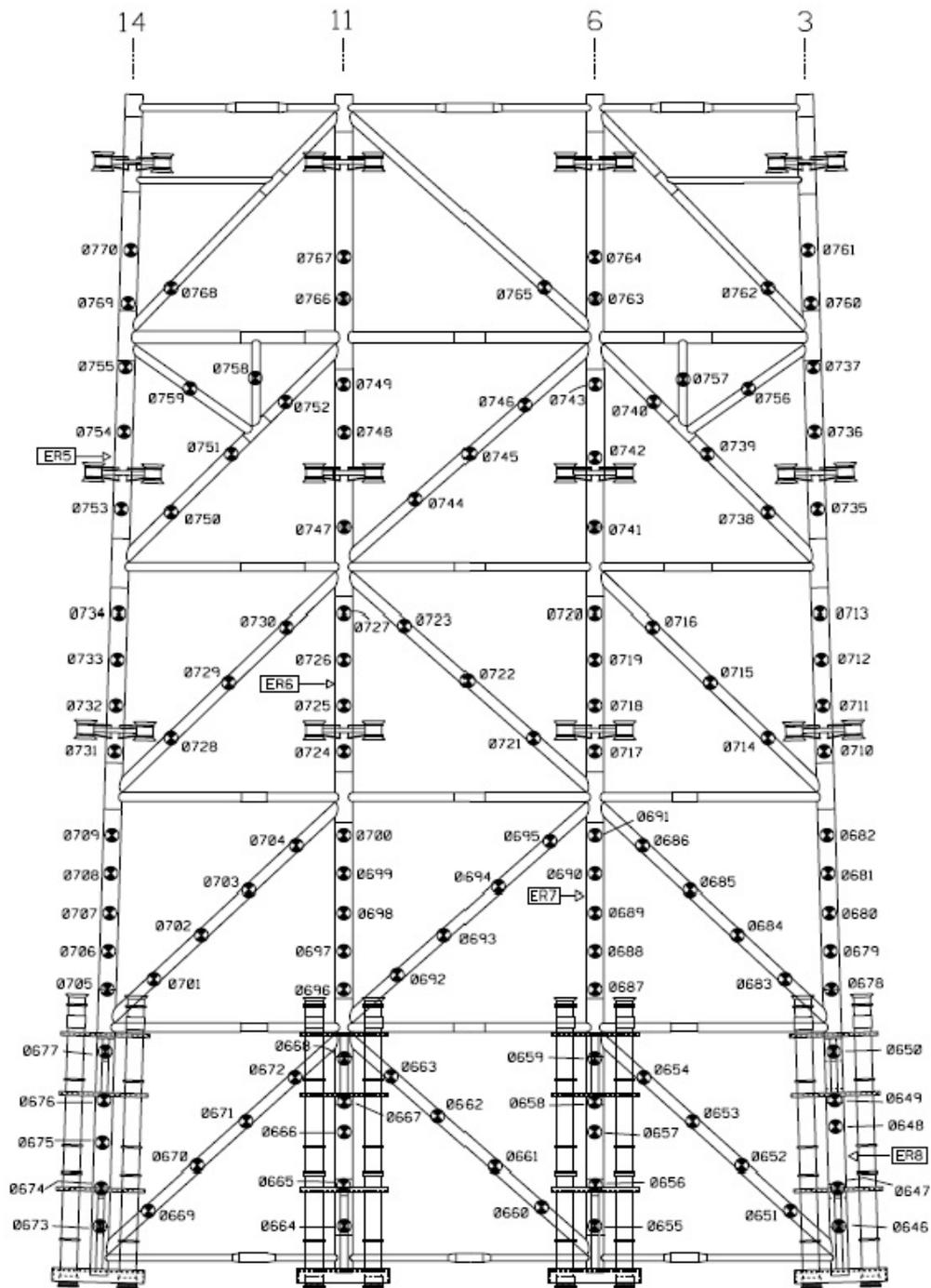


Figura 5 – Planta de uma das faces da jaqueta com identificação e arranjo dos anodos galvânicos

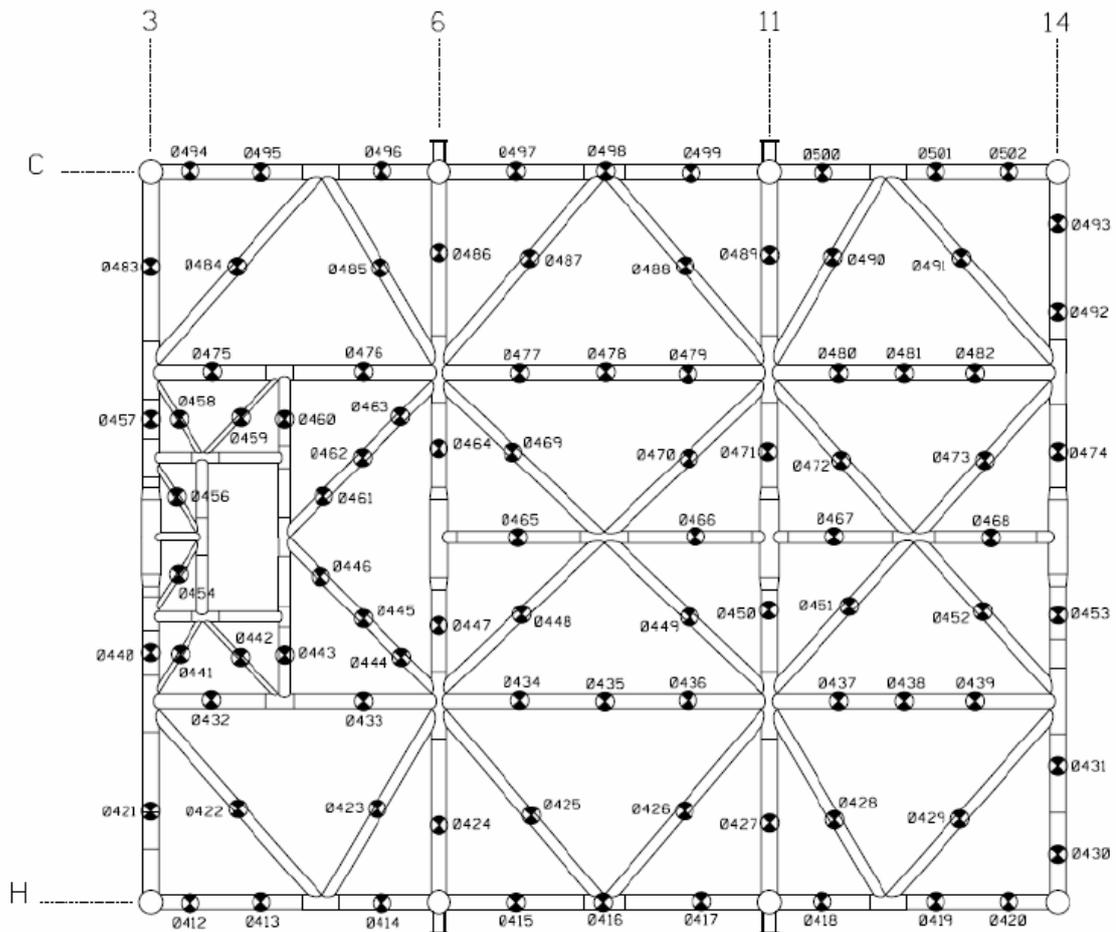


Figura 6 – Planta de uma das mesas da jaqueta com identificação e arranjo dos anodos galvânicos

A figura 7 mostra as dimensões iniciais típicas de anodos para instalação em jaquetas e a figura 8 mostra as disposições dos anodos ao redor dos membros das jaquetas.

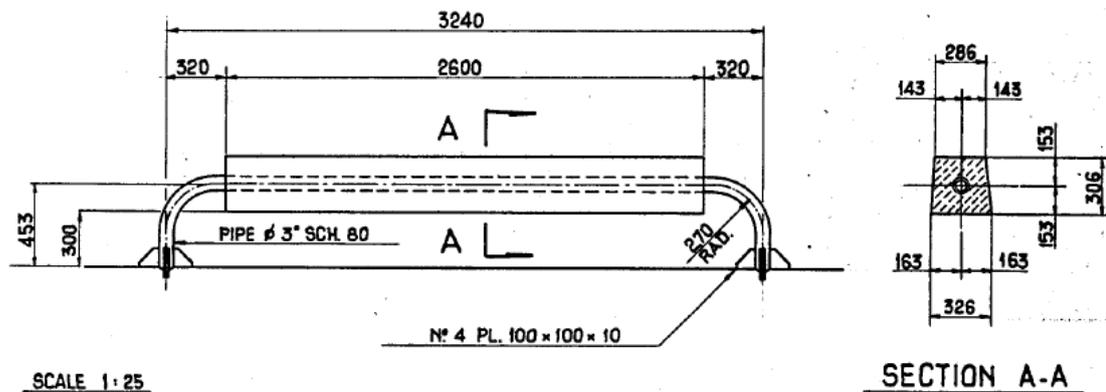


Figura 7 – Dimensões iniciais típicas dos anodos galvânicos na jaqueta

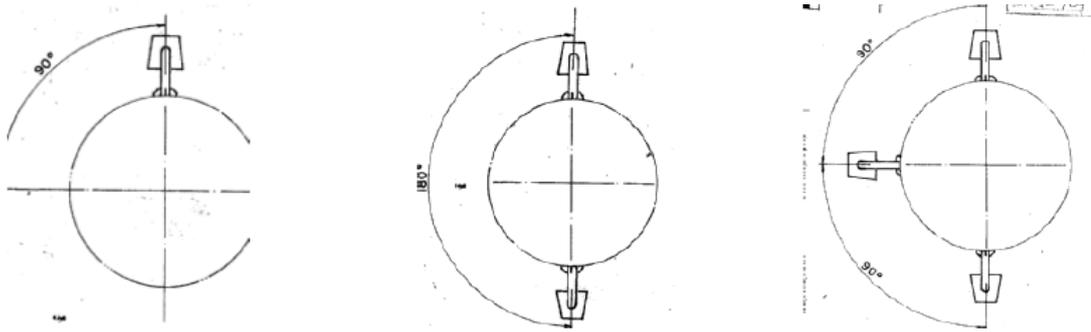


Figura 8 – Disposição de anodos em grupo de até três, espaçados de 90° em relação à uma mesma seção

2.4 Acompanhamento e diagnóstico do sistema de proteção catódica da jaqueta (4), (5), (6), (7) e (8)

O SPC é acompanhado através de inspeções realizadas periodicamente pelas equipes de engenharia submarina, com intervalo máximo de 5 anos, onde ao final de cada uma é emitido um relatório técnico com as informações necessárias para uma avaliação pelas equipes responsáveis acerca da integridade estrutural da jaqueta e do funcionamento do sistema de proteção anticorrosiva.

A monitoração e acompanhamento periódico da proteção catódica para sistemas por corrente galvânica compõe-se basicamente de inspeção visual, dimensional e verificação da fixação dos anodos galvânicos, e da realização de medições de potencial eletroquímico utilizando-se eletrodos de referência padrão devidamente calibrados, sendo empregados para água do mar os de zinco (Zn) ou de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl). Ainda com relação ao potencial, adotam-se os seguintes critérios de proteção para uma estrutura adequadamente polarizada:

- Valores iguais ou mais negativos que $-0,80V$, limitados a $-1,10V$, em relação ao eletrodo de referência de Ag/AgCl.
- Valores iguais ou menos positivos que $+0,25V$, limitados a $-0,05V$, em relação ao eletrodo de referência de Zn.

Valores atualizados de potencial menos negativos que $-0,90 V$ em relação ao eletrodo padrão de Ag/AgCl ou mais positivos que $+0,15 V$ em relação ao eletrodo de Zn, para o caso de sistemas galvânicos onde não se tem possibilidade de ajuste, já podem ser considerados como indicador de que um estudo para revitalização do sistema deve ser priorizado. Com base na norma DNV-RP-B101 (8) a tabela 1 orienta as ações necessárias ao sistema dependendo dos valores de potencial medidos.

Tabela 1 – Requisitos de ação e monitoramento de potencial

Potencial medido Ag/AgCl (água do mar)	Ação requerida
Mais negativo que -1,00 V	Verificar os valores de ajuste do sistema de corrente impressa
Mais negativo que -0,90 V	Nenhuma
Mais positivo que -0,90 V	Monitorar e planejar projeto de revitalização
Mais positivo que -0,80 V	Substituir os anodos imediatamente

As medições de potencial na jaqueta podem ser realizadas de três maneiras:

- Por meio de mergulhador até a profundidade permitida para mergulho raso, normalmente até 30 m, geralmente utilizando-se eletrodo de referência de Ag/AgCl acoplado em um instrumento portátil denominado *bathycorrometer*;



Figura 9 – Medição de potencial com utilização do bathycorrometer

- Por meio de equipamento operado remotamente (ROV), em qualquer profundidade até atingir o leito marinho;



Figura 10 – Medição de potencial utilizando ROV

- Por meio de um eletrodo portátil pendular, podendo ser de Zn ou Ag/AgCl, lançado do deck inferior da plataforma (*spider deck*), posicionando-o próximo à estrutura em pontos pré-definidos, descido até uma profundidade máxima equivalente ao mergulho raso, para se evitar que o cabo elétrico agarre nos membros da jaqueta, e feitas as medições em intervalos de 5 metros de profundidade. Este tipo de medição deve ser realizada somente com mar calmo. As medições com eletrodo portátil podem ser realizadas nos intervalos entre as campanhas submarinas com equipamento ROV.

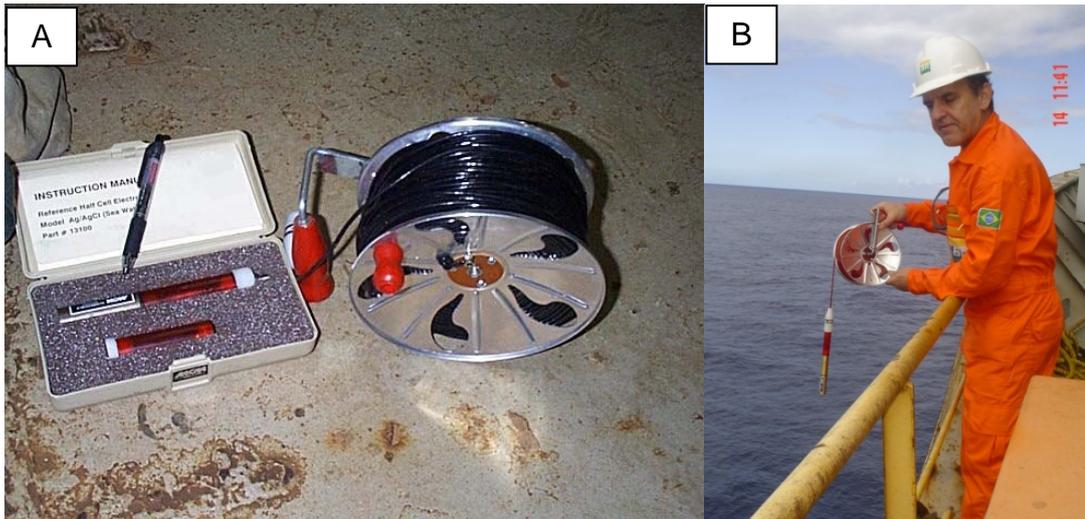


Figura 11 – (A) Eletrodo portátil pendular e (B) Medição de potencial utilizando eletrodo portátil pendular

A inspeção visual e dimensional dos anodos ao longo do tempo também é um indicador importante no que diz respeito à efetividade da proteção, funcionamento adequado dos anodos e previsibilidade para início do projeto de revitalização do sistema. A figura 12 mostra os cinco níveis típicos de desgaste observados nos anodos.

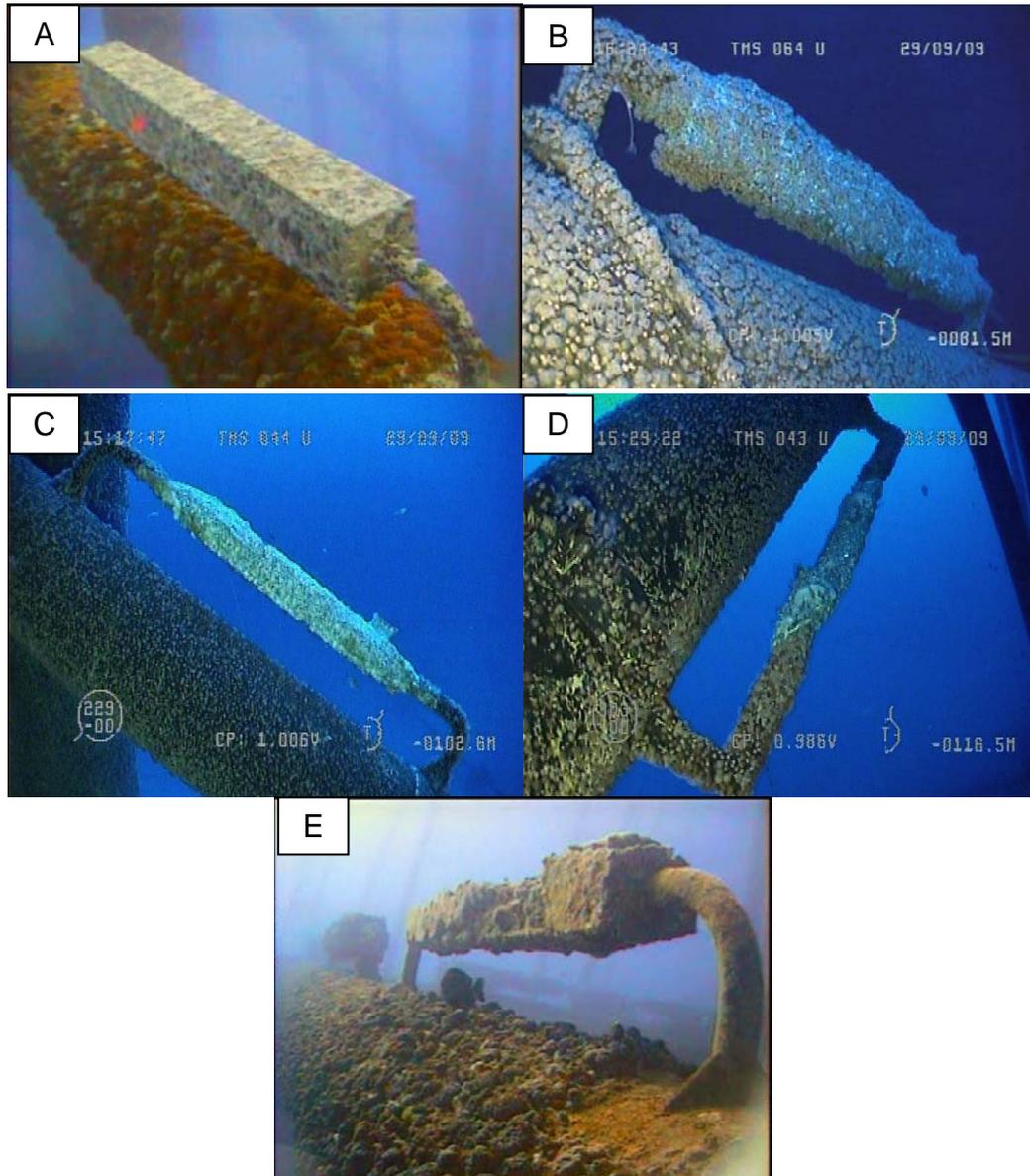


Figura 12 – Anodos galvânicos com (A) desgaste generalizado leve - DGL (B) desgaste generalizado médio - DGM (C) desgaste generalizado severo – DGS (D) alma sem massa anódica e (E) desgaste irregular - DI

Para o diagnóstico adequado do SPC galvânico da jaqueta deve-se correlacionar os valores de potencial com a evolução do desgaste dos anodos. Anodos com intensidade de desgaste severo, irregular ou anodos totalmente desgastados (restando somente a alma), associados com valores de potencial entre $-0,80\text{ V}$ e $-0,90\text{ V}$ indicam a necessidade de se intensificar o acompanhamento do sistema e de se planejar o projeto de revitalização. Neste caso, torna-se recomendável reduzir o tempo entre campanhas de inspeção, aumentando-se os pontos de amostragem nas inspeções subsequentes, principalmente nas regiões com anodos mais desgastados. Estas ações tem por objetivo evitar à médio prazo a subproteção da estrutura, a dissolução da camada calco-magnésiana, o início do processo corrosivo e consequentemente a necessidade de maior demanda de corrente para repolarização (maior custo do projeto de revitalização).

A seguir mostramos o acompanhamento de um SPC galvânico instalado na jaqueta de uma plataforma fixa da Bacia de Campos em lâmina d'água de 142 m, o diagnóstico levantado e as recomendações para o sistema.

- Vida útil do projeto original do SPC (corrente galvânica): 30 anos;
- Data de início de operação do sistema: 1984;
- Tempo em operação em 2014: 30 anos (vida útil expirando).

A tabela 2 mostra um resumo da inspeção dos anodos realizada com ROV no ano de 2008 na jaqueta em questão.

Tabela 2 – Resumo da inspeção submarina dos anodos da jaqueta

Local		Quantidade de anodos instalados na jaqueta (projeto)	Quantidade de anodos inspecionados (ROV 2008)		Massa anódica original (projeto)
Face	A	246	238	96,75%	151.536 kg
	C	222	219	98,65%	136.752 kg
	1	153	104	67,97%	94.248 kg
	2	128	97	75,78%	78.848 kg
	5	128	97	75,78%	78.848 kg
	6	158	158	100,00%	97.328 kg
Mesa	Elevação -19,0 m	85	85	100,00%	52.360 kg
	Elevação -46,5 m	133	61	45,86%	81.928 kg
	Elevação -74,0 m	146	118	80,82%	89.936 kg
	Elevação -107,5 m	175	170	97,14%	107.800 kg
	Elevação -142,0 m	153	23	15,03%	94.248 kg
TOTAL		1.727	1.370	79,33% do total	M _{total} = 1.063.832 kg

- Massa líquida de cada anodo: 616 kg.
- M_{total}: massa anódica total do projeto original.

A tabela 3 indica a classificação do desgaste dos anodos, onde a maior parte deles, ou 94,89% do total, encontrava-se com intensidade de desgaste médio e severo, sendo 76,86% com DGM e 18,03% com DGS.

Tabela 3 – Situação física dos anodos

Face	Profundidade	DGL	%	DGM	%	DGS	%	DI	%	Alma	%	Total
Face A	19 m - 46 m	-	-	35	100%	-	-	-	-	-	-	35
	46 m - 74 m	-	-	31	86%	5	14%	-	-	-	-	36
	74 m - 107 m	-	-	31	65%	15	31%	1	2%	1	2%	48
	107 m - 142 m	-	-	50	42%	60	50%	2	2%	7	6%	119
Face C	19 m - 46 m	-	-	35	100%	-	-	-	-	-	-	35
	46 m - 74 m	-	-	21	60%	10	29%	4	11%	-	-	35
	74 m - 107 m	-	-	20	49%	19	46%	-	-	2	5%	41
	107 m - 142 m	-	-	63	58%	45	42%	-	-	-	-	108
Face 1	19 m - 46 m	-	-	15	100%	-	-	-	-	-	-	15
	46 m - 74 m	-	-	4	57%	1	14%	2	29%	-	-	7
	74 m - 107 m	-	-	8	73%	3	27%	-	-	-	-	11
	107 m - 142 m	-	-	69	97%	2	3%	-	-	-	-	71
Face 2	19 m - 46 m	-	-	8	100%	-	-	-	-	-	-	8
	46 m - 74 m	-	-	19	76%	-	-	6	24%	-	-	25
	74 m - 107 m	-	-	26	76%	7	21%	1	3%	-	-	34
	107 m - 142 m	-	-	15	50%	11	37%	-	-	4	13%	30
Face 5	19 m - 46 m	-	-	8	100%	-	-	-	-	-	-	8
	46 m - 74 m	-	-	24	96%	-	-	1	4%	-	-	25
	74 m - 107 m	-	-	15	44%	9	27%	10	29%	-	-	34
	107 m - 142 m	-	-	17	57%	13	43%	-	-	-	-	30
Mesas	EL. -19 m	-	-	85	100%	-	-	-	-	-	-	85
	EL. -46,5 m	-	-	60	98%	-	-	1	2%	-	-	61
	EL. -74 m	-	-	116	98%	1	1%	1	1%	-	-	118
	EL. -107,5 m	2	1%	159	94%	8	4%	1	1%	-	-	170
	EL. -142 m	-	-	18	78%	3	13%	2	9%	-	-	23
Face 6	19 m - 46 m	-	-	24	100%	-	-	-	-	-	-	24
	46 m - 74 m	-	-	25	100%	-	-	-	-	-	-	25
	74 m - 107 m	-	-	16	50%	16	50%	-	-	-	-	32
	107 m - 142 m	-	-	36	47%	19	25%	17	22%	5	6%	77

Legenda:

DGL = desgaste generalizado leve
DGM = desgaste generalizado médio
DGS = desgaste generalizado severo
DI = desgaste irregular
Alma = sem massa anódica.

Com base nas informações do relatório de inspeção submarina com ROV, é possível realizar uma simulação do cálculo de vida útil remanescente do sistema galvânico instalado, considerando-se os desgastes apresentados na tabela 3 anterior.

Para cada estado de degradação (desgaste) dos anodos é atribuído um peso, padronizado pelo avaliador, conforme sugestão na tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Peso atribuído para cada tipo de desgaste

Tipo de desgaste	Peso atribuído pelo avaliador	Percentual de massa anódica remanescente
SD (Sem Desgaste)	1	100%
DGL	0,9	90%
DGM	0,5	50%
DGS	0,2	20%
DI (= DGM)	0,5	50%
Alma	0,01	1%

Com isso pode-se estimar a massa anódica remanescente do sistema, relacionando-se:

$$M_{rem} = \frac{\sum (N_{an.insp} \cdot \%_{desgaste} \cdot P_{atrib.desgaste})}{N_{total\ an.insp}} \times M_{total}$$

Sendo:

M_{rem} = Massa anódica remanescente, em kg;

$N_{an.insp}$ = N° de anodos inspecionados por tipo de desgaste;

$\%_{desgaste}$ = Percentual parcial de anodos inspecionados conforme o tipo de desgaste em relação ao total de anodos inspecionados;

$P_{atrib.desgaste}$ = Peso atribuído pelo avaliador ao tipo de desgaste;

$N_{total\ an.insp}$ = N° total de anodos inspecionados;

M_{total} = massa anódica total do projeto original, em kg.

Desta forma, a massa anódica remanescente calculada é de 321.809 kg, ou 30,25% da massa anódica total do projeto original.

Aplicando-se a equação do critério da massa para estimar a vida útil do sistema.

$$V_{rem} = \frac{M_{rem} \cdot C \cdot F_u}{8.760 \cdot I_f}$$

Onde:

V_{rem} = Vida útil remanescente estimada, em anos;

M_{rem} = Massa anódica remanescente, em kg;

C = Capacidade de corrente do anodo utilizada no projeto, em A.h/kg;

F_u = Fator de utilização do anodo do projeto, adimensional;

I_f = Corrente final de proteção catódica do projeto (submersa e submersa enterrada), em A.

Os valores considerados para o cálculo estão a seguir.

$M_{rem} = 321.809$ kg;

$C = 1.850$ A.h/kg;

$F_u = 0,90$ (tipo alongado);

$I_f = 7.448,70$ A.

Substituindo-se os valores na equação estima-se a vida útil remanescente de 8,21 anos para o sistema existente, contando-se a partir da data de elaboração do relatório de inspeção submarina disponível como referência (ROV de 2008). Considerando-se então a simulação aqui apresentada, o sistema de proteção catódica da plataforma em questão possui uma vida útil restante em relação à massa anódica de mais 2 anos (até 2016), mostrando coerência e mesmo superando o tempo teórico de projeto, que seria 2014; indicando também que o sistema galvânico foi bem dimensionado e a formação calco-magnésiana está atuando adequadamente como barreira, reduzindo no tempo a demanda de corrente e retardando o consumo dos anodos.

Nas tabelas 5 e 6 apresentamos os valores de potencial medidos com ROV e mergulho raso, respectivamente, na campanha de intervenção submarina realizada em 2008.

Tabela 5 – Medição de potencial eletroquímico com relação ao eletrodo de referência Ag/AgCl (ROV – Setembro a novembro 2008)

	Local	Maior valor medido	Menor valor medido
Face	A	-0,870 V	-0,906 V
	C	-0,875 V	-0,914 V
	6	-0,881 V	-0,908 V
	5	-0,885 V	-0,920 V
	2	-0,880 V	-0,925 V
	1	-0,881 V	-0,912 V
Mesa	elevação - 19 m	-0,912 V	-0,919 V
	elevação - 46 m	-0,912 V	-0,918 V
	elevação - 74 m	-0,902 V	-0,920 V
	elevação - 107 m	-0,887 V	-0,911 V
	elevação - 142 m	-0,862 V	-0,887 V

Tabela 6 – Medição de potencial eletroquímico com relação ao eletrodo de referência Ag/AgCl (Mergulho raso – Junho a dezembro de 2008)

Local		Maior valor medido	Menor valor medido
Face	A	-1,028 V	-1,035V
	C	-1,030 V	-1,038 V
	6	-1,034 V	-1,034 V
	5	-1,029 V	-1,029 V
	2	-1,040 V	-1,040 V
	1	-1,029 V	-1,029 V

Os valores medidos indicaram que regiões da jaqueta já apresentam níveis de potencial mais positivos que -0,90 V, em todas as faces e principalmente nas regiões mais profundas nas elevações -107 m e -142 m, mostrando que o sistema vem atuando adequadamente, contudo a correlação entre desgaste de anodos no tempo e os potenciais sugerem que um projeto de revitalização deve ser iniciado, e que esteja completamente instalado, ajustado e funcionando adequadamente antes do prazo limite de 2016.

2.5 Projetos de revitalização

A proteção anticorrosiva das jaquetas, excetuando-se a ZVM, é feita apenas pela proteção catódica. Desta forma, torna-se imprescindível o correto funcionamento do sistema. Uma vez ultrapassada a vida útil do sistema, não se pode garantir a integridade dos materiais sob sua proteção, devendo-se iniciar um projeto específico pelo menos 3 anos antes do prazo final estimado para o sistema. As plataformas fixas são as que mais necessitam da técnica de revitalização na locação, justamente pela impossibilidade de remoção das jaquetas.

As empresas especializadas em projetos de revitalização na locação desenvolveram sistemas de proteção catódica galvânicos com anodos fixados diretamente na estrutura e/ou instalados em *skids* e estes posicionados no leito marinho à uma certa distância da jaqueta, com lançamento de cabo elétrico do *skid* até a conexão com a estrutura da jaqueta. Ambas as tecnologias não necessitam de serviços de soldagem submarina, pois utilizam grampos para fixação mecânica. O *retrofit* com sistemas por corrente impressa foi desenvolvido utilizando-se dois tipos de tecnologias: anodos instalados ao longo de tirantes verticais lançados normalmente pelo centro da jaqueta e anodos instalados em *skids* posicionados ao redor da jaqueta distante de qualquer estrutura ou equipamento submarino existentes nas proximidades.

Dentre as tecnologias apresentadas, a revitalização por meio de anodos galvânicos seria a mais prática e trivial, pois para a manutenção da corrente de proteção seriam simplesmente adicionados anodos galvânicos ao sistema existente, mantendo-se assim a rotina de inspeções e medições. Porém, a instalação de centenas de conjuntos de anodos em alto mar, pesando em torno de 500 kg por conjunto, dificulta consideravelmente os trabalhos submarinos no que diz respeito à logística de transporte, manuseio, descida e instalação na estrutura, aumentando-se o prazo e recursos disponibilizados para o contrato, além do custo, podendo inviabilizar economicamente este tipo de projeto para aplicação em jaqueta, frente às tecnologias disponíveis por corrente impressa. A aplicação de sistemas galvânicos em grandes áreas sem

revestimento, como jaquetas, pode ter demanda para proteção localizada de regiões deficientes.

Uma restrição ao uso de sistemas por corrente impressa é a necessidade de espaço físico na plataforma para alocação de retificadores, como também limitação na utilização de bandejamentos existentes para passagem dos cabos elétricos dos anodos e do sistema de monitoração, podendo eventualmente envolver a realização de projetos de adequação o que aumenta a logística de planejamento, o custo e tempo para implantação do projeto.

Neste trabalho serão apresentados dois tipos de projetos utilizando sistemas por corrente impressa que possuem melhor relação custo-benefício que os sistemas galvânicos, levando-se em consideração a realização de serviços na locação e os altos custos relacionados com recursos e mão-de-obra da área submarina (equipe de mergulho, equipamento ROV, embarcações de apoio).

A tabela 7 apresenta as etapas principais do projeto e prazos estimados para conclusão:

Tabela 7 – Etapas e prazos estimados do projeto de revitalização por corrente impressa

Item	Descrição	Prazo	
1	Consulta prévia aos fornecedores: informações sobre a tecnologia disponível	2 meses	
2	Reunião inicial com fornecedores: dúvidas técnicas e estimativa de custo	1 mês	
3	Preparação do processo licitatório e elaboração da documentação complementar como Especificação Técnica, Planilhas de Preços, Memorial Descritivo, Orçamentação Interna	6 meses	
4	Licitação	2 meses	
5	Assinatura de contrato e reunião para início dos serviços	1 mês	
6	Projeto	6.1 - Levantamento de campo	20 dias
		6.2 - Projeto básico	2 meses
		6.3 - Projeto de detalhamento	3 meses
		6.4 - Aquisição de materiais	8 meses
		6.5 - Instalação e montagem nas regiões emersa e imersa	6 meses
		6.6 - Pré-operação do novo sistema	2 meses
		6.7 - Treinamento das equipes de operação e manutenção do sistema	10 dias
		6.8 - Entrega da documentação final de projeto “conforme construído” e Data Book da obra	2 meses

Tabela 7 – Etapas e prazos estimados do projeto de revitalização por corrente impressa (continuação)

Item	Descrição	Prazo
7	Encerramento do contrato	–
8	Pós-venda. Garantia dos serviços e materiais	Mínimo 12 meses
9	Operação e acompanhamento do sistema pelo cliente	–

PRAZO ESTIMADO PARA CONCLUSÃO DO PROJETO (até o item 6 da tabela 7 acima): 36 MESES.

2.5.1 Sistema por corrente impressa com anodos instalados no leito marinho (9)

O modelo de revitalização com anodos remotos consiste na instalação de pontos de injeção individuais ou agrupados em *skids* metálicos, conforme a figura 13, posicionados no leito marinho.

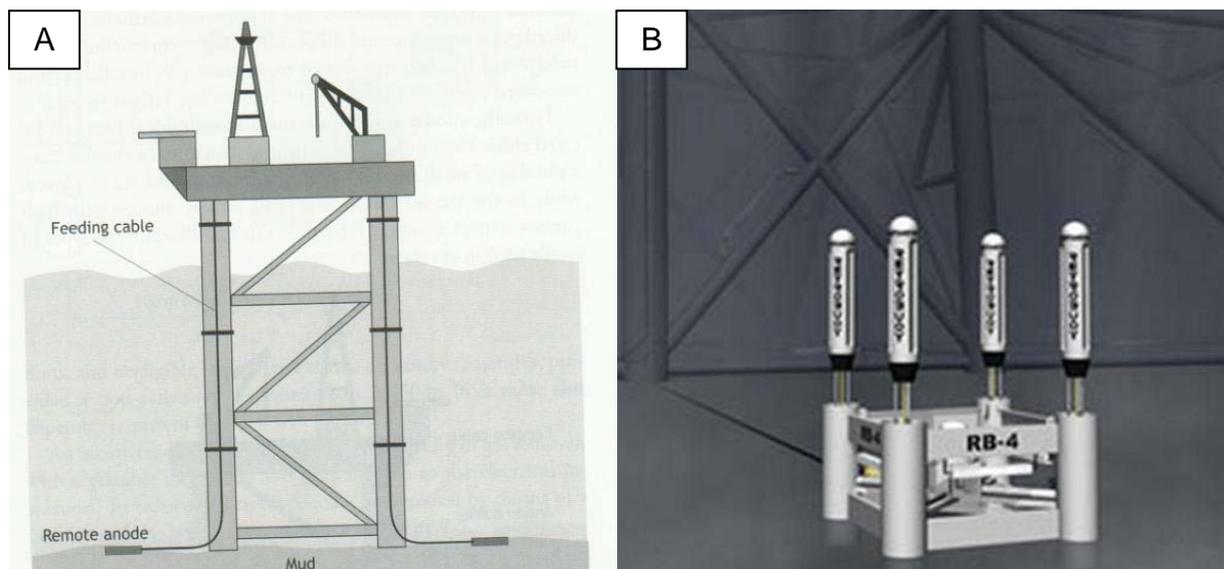


Figura 13 – Esquema de revitalização com anodos dispostos remotamente: (A) Anodos remotos assentados no leito marinho e (B) Detalhe de *skid* posicionado no leito marinho com anodos remotos instalados em bóias.

A quantidade de conjuntos de retificadores/anodos a serem instalados vai depender do dimensionamento do projeto em função do tamanho e complexidade da jaqueta, sendo esperado entre 5 e 10 pontos de injeção de corrente. Sendo o sistema original por corrente galvânica, não existe opção de reutilização de componentes para o novo sistema.

Este tipo de projeto requer cuidado adicional uma vez que os pontos de injeção são alocados ao redor da jaqueta, onde existem diversas instalações metálicas submarinas como, por exemplo, linhas, dutos e equipamentos, devendo-se mantê-los afastados a uma distância mínima de quaisquer destas instalações de maneira a evitar interferências eletrolíticas indesejáveis. Ou seja, o posicionamento final de cada conjunto poderá ser tal que alguns deles

tenham que injetar correntes bem reduzidas ou bem elevadas de forma a suprir a demanda de corrente necessária para proteção da jaqueta. Isso leva à necessidade eminente de se efetuar estudos de simulação numérica de potenciais levando-se em consideração as alternativas de instalação dos pontos de injeção e estruturas existentes no leito marinho.

A descida dos cabos pela jaqueta, principalmente na região da ZVM, deve ser feita pelo interior de tubos condutores existentes, ou instalando-se novos, de forma a evitar as solicitações das ondas e correnteza nesta região podendo fragilizar a instalação e danificar cabos elétricos.

Espera-se que este tipo de projeto utilize mais tempo de recursos de embarcação de apoio e equipamento ROV, e menos equipe de mergulho raso atuando esta na instalação de acessórios na região da ZVM e pouco abaixo disto.

2.5.2 Sistema por corrente impressa com anodos fixados em tirantes ao longo da jaqueta (10)

Este modelo de revitalização também utiliza a técnica de anodos remotos, porém os anodos se distribuem através de cabos de aço instalados tanto pelas laterais quanto pelo meio da jaqueta, conforme exemplificado na figura 14. Pelo fato dos anodos serem posicionados verticalmente ao longo da estrutura da jaqueta indica que pode haver melhor distribuição de corrente, reduzindo-se os riscos de sombreamento como também regiões de sub ou superproteção.

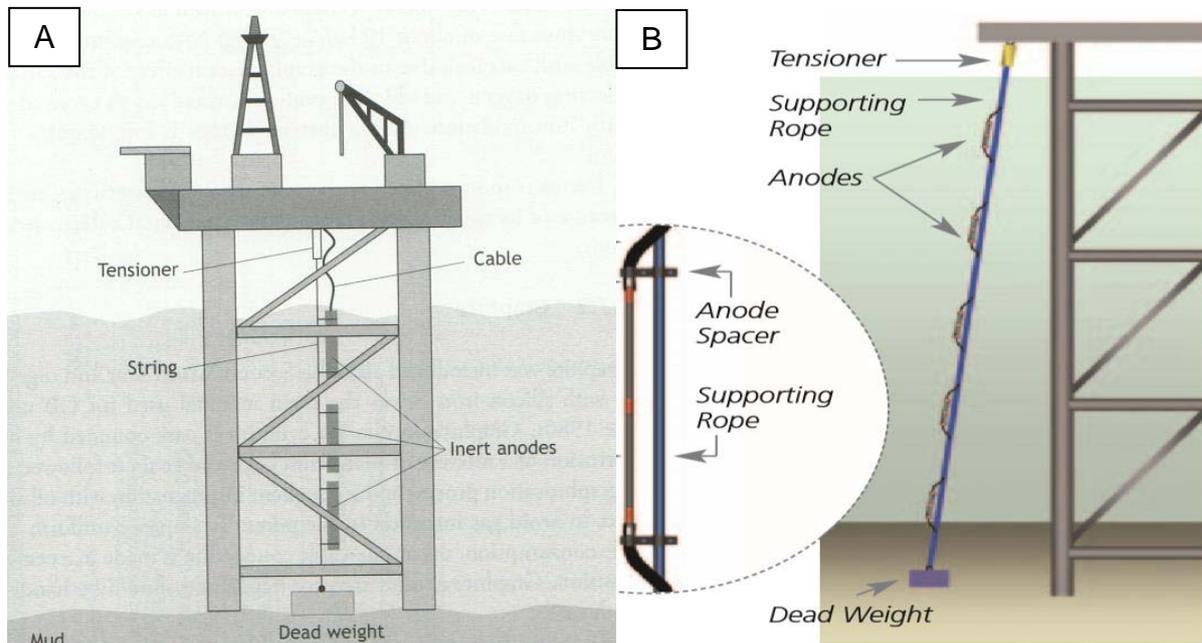


Figura 14 – Dois esquemas de revitalização com anodos em tirantes: (A) Instalação pelo centro da jaqueta e (B) Instalação pela parte externa da face

A instalação deste sistema consiste na alocação de poitas (peso morto), de aço ou concreto, no leito marinho com aproximadamente 20 toneladas de peso bruto cada uma para fixação dos tirantes na parte inferior. No convés da plataforma mais próximo da lâmina d'água (*spider deck*) são soldados os olhais para fixação dos tirantes na parte superior do conjunto. Os tirantes de aço são então instalados para passagem de cabos elétricos e sustentação dos anodos

ao longo da jaqueta. Também podem ser utilizados tirantes para instalação dos eletrodos de referência permanentes para monitoração dos potenciais em diversas profundidades da estrutura da jaqueta.

A quantidade de conjuntos de retificadores/anodos a serem instalados, assim como o primeiro tipo de sistema apresentado em 2.5.1, vai depender do dimensionamento do projeto em função do tamanho e complexidade da jaqueta, além da disponibilidade para lançamento das poitas pelo interior da jaqueta e posicionamento no leito marinho, sendo esperado entre 5 e 10 pontos de injeção de corrente.

Espera-se que este tipo de projeto não utilize embarcação de apoio. O equipamento ROV poderá ser utilizado, descendo-o diretamente da plataforma, para orientação com relação ao posicionamento das poitas e fixação dos tirantes na extremidade inferior do conjunto. O mergulho raso poderá ser demandado durante o lançamento dos cabos de aço pela estrutura da jaqueta. Este tipo de projeto também requererá a utilização de serviços de escalador industrial para fixação dos olhais no convés inferior da plataforma.

3. Resultados e discussão

As inspeções realizadas em uma plataforma fixa da PETROBRAS na Bacia de Campos mostram que o sistema de proteção catódica original, por meio de anodos galvânicos, está atuante e protegendo a jaqueta. Porém os níveis de potencial medidos com equipamento ROV, associados ao acompanhamento do desgaste dos anodos assim como o tempo em operação do sistema, já completando a vida útil de 30 anos, indicam que um projeto de revitalização deve ser iniciado.

O consumo dos anodos galvânicos reduz gradativamente a injeção de corrente necessária à manutenção da proteção. Os valores de potencial, ainda adequados, mostram que o sistema original foi bem dimensionado e vem atuando com eficácia. A polarização do aço e a existência da camada calco-magnésiana aderida na estrutura reduz a área exposta ao ambiente agressivo e, conseqüentemente, reduz a demanda de corrente dos anodos. Vale ressaltar que, pelo fato da camada calco-magnésiana ser hidrossolúvel, à medida que a proteção catódica se torna deficiente, há redução da polarização da estrutura e a dissolução da mesma, aumentando-se as áreas expostas à corrosão.

É importante frisar que não é possível precisar a taxa de desgaste dos anodos como um todo, uma vez que este desgaste não tem comportamento linear e nem é igual para cada anodo, pois os micro e macro fatores inerentes tanto à própria composição da liga do anodo (lote de fabricação) quanto a fatores externos como salinidade local, correnteza, temperatura, oxigenação no meio e outros, podem contribuir acelerando ou reduzindo a taxa de desgaste individual ou por grupos de anodos o que pode, no segundo caso, acarretar uma redução significativa na estimativa de vida útil remanescente apresentada no item 2.4.

Em um sistema de proteção catódica dimensionado adequadamente, o potencial da estrutura protegida se situará entre -0,90 V e -1,05 V durante a maior parte de sua vida útil. Próximo ao final da vida o potencial tenderá a se tornar mais positivo, podendo atingir o limite de -0,80 V e, caso nenhuma medida seja tomada, o sistema perderá a capacidade de proteção deixando a

jaqueta desprotegida. Por isso o projeto de revitalização deve ser iniciado pelo menos 3 anos antes do final da vida útil esperada para o sistema. O trabalho mostrou que um acompanhamento da operação do sistema, aliado a um adequado planejamento, permitirá que um novo sistema de proteção anticorrosiva seja implementado a tempo, na própria locação, permitindo que a unidade marítima produza com segurança por mais tempo. O projeto de revitalização deve ser planejado e dimensionado levando-se em consideração a perspectiva do campo de produção em questão.

As intervenções submarinas realizadas com equipamento operado remotamente permite uma inspeção mais abrangente e detalhada do sistema de proteção catódica, com relação à uniformidade do desgaste dos anodos em cada região da plataforma da mais rasa próxima da ZVM até regiões mais profundas, possíveis assoreamentos de anodos no leito marinho, danos mecânicos devido à queda de materiais da região emersa, desvio entre o inventário físico e os desenhos de projeto, e medições de potencial em todas as profundidades, informações importantes para o adequado diagnóstico do SPC. Medições intermediárias complementares por meio de eletrodo de referência portátil pendular até a profundidade de 30 m podem ser realizadas para um acompanhamento do sistema além das inspeções submarinas com ROV e mergulho raso, de forma a subsidiar a avaliação periódica do sistema.

4. Conclusões

Uma análise de diagnóstico do Sistema de Proteção Catódica (SPC) deve ser feita com antecedência mínima de 3 anos do prazo final do projeto original, para se conhecer o estado do mesmo e verificar se é viável a reformulação do sistema já em final de vida útil.

A revitalização de um sistema de proteção catódica na locação é perfeitamente viável, e imprescindível principalmente para unidades marítimas do tipo fixas. Pode-se empregar um sistema por corrente impressa ou por corrente galvânica, devendo-se fazer uma avaliação técnico-econômica sobre qual tipo adotar. Para jaquetas esta avaliação mostrou que para a substituição integral do sistema existente, a adoção de um sistema por corrente impressa pode ser uma boa prática considerando-se o custo total do projeto, principalmente os custos de instalação na locação em alto mar que são bastante elevados e os recursos críticos envolvidos (embarcações de apoio, equipamento operado remotamente, e equipes de mergulho e alpinismo industrial).

A jaqueta, por possuir geometria complexa e estar alocada em regiões com diversas estruturas metálicas ao redor como equipamentos submarinos e linhas de produção e escoamento, necessita de estudos específicos para dimensionamento de um sistema de proteção catódica por corrente impressa, incluindo-se um estudo de simulação numérica de potenciais, estudo de análise hidrodinâmica dos cabos submarinos e um estudo de impacto ambiental e de segurança.

Uma simulação de vida útil deve ser feita sempre que for realizada uma inspeção abrangente com ROV, correlacionando-se com os valores de potencial medidos, sugerindo o momento oportuno para se planejar a substituição do sistema de proteção catódica existente.

Recomenda-se a elaboração de um Plano de Inspeção para o acompanhamento do sistema de proteção catódica das jaquetas, definindo-se a periodicidade das inspeções, o escopo e tipo de inspeção (se mergulho raso, ROV ou com eletrodo portátil pendular), e amostragem de pontos a serem verificados com quantidade de anodos e/ou medições de potencial.

A revitalização de sistema de proteção catódica de jaqueta é uma atividade multidisciplinar que envolve gerências de engenharia, sistemas elétricos, projetos, construção e montagem, além da gerência de serviços submarinos, o que exigirá do gerente de contratos responsável pelo projeto bastante experiência na condução de um empreendimento deste tipo.

5. Referências bibliográficas

- (1) NOTÍCIAS BACIA DE CAMPOS. Rio de Janeiro: PETROBRAS. Quinzenal. Ano XXIII, nº 235.
- (2) DUTRA, A. C.; NUNES, L.P. Proteção Catódica: Técnica de Combate à Corrosão. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência,2006.
- (3) LAZZARI, L; PEDEFERRI, P. Cathodic Protection. Milão: Polipress, 2006.
- (4) RELATÓRIO TÉCNICO. Diagnóstico do Sistema de proteção catódica. PETROBRAS, 2010.
- (5) RELATÓRIO TÉCNICO. Intervenção Submarina com ROV. Inspeção da Jaqueta e Acessórios. Sistac, 2008.
- (6) RELATÓRIO TÉCNICO. Intervenção Submarina – Mergulho Raso. Inspeção na Jaqueta e Acessórios. Sistac, 2008.
- (7) DET NORSKE VERITAS. Cathodic Protection Design. Recommended Praticce DNV-RP-B401. DNV, 2010.
- (8) DET NORSKE VERITAS. Corrosion Protection of Floating Production and Storage Units. Recommended Praticce DNV-RP-B101. DNV, 2007.
- (9) DEEP WATER, Retro Buoy. Cathodic Protection Systems. Disponível em: <<http://www.stoprust.com/retro-buoy.htm>> Acesso em: janeiro de 2014.
- (10) DENORA, Lida TSA Anodes. Cathodic Protection. Disponível em: <http://www.denora.com/Downloads/en-US/Products/LIDA_TSA_Anodes.pdf> Acesso em: janeiro de 2013.