

# APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE ANÁLISE DE FALHA - FMEA NA INSTALAÇÃO DE BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO (BCS) EM CAMPOS MADUROS ONSHORE NA BACIA DO RECONCAVO.

Luiz Eduardo Marques Bastos (1), Jeanderson Mançu (2)

(1) Doutor, Engenheiro Mecânico, Pesquisador do Mestrado em Energia da Universidade Salvador – Unifacs  
[eduardo.bastos@unifacs.br](mailto:eduardo.bastos@unifacs.br)

(2) Mestre, Engenheiro de Produção, Professor da Faculdade Santissimo Sacramento – Bahia -  
[jeanderson.mancu@gmail.com](mailto:jeanderson.mancu@gmail.com)

## Resumo

O Sistema de Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) é um dos métodos de elevação artificial de petróleo mais utilizados, tanto para produzir grandes volumes de fluidos, quanto para bombear tais fluidos a partir de profundidades elevadas. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo pesquisar algumas das ferramentas e métodos de análise de falha aplicáveis na indústria do petróleo, além de propor aplicação de uma das ferramentas no processo de instalação dos equipamentos de sistemas BCS das empresas Beta e Delta, em poços produtores de petróleo localizados na Bacia do Recôncavo, no Estado da Bahia.

A pesquisa foi realizada a partir de estudos em referências bibliográficas para contextualizar a indústria, conceituar o método de elevação artificial através de sistemas BCS e tipos de ferramentas e métodos de análise de falhas nela utilizados. Para identificar e investigar a aplicação de ferramentas de análise da falha no sistema BCS, foram realizados estudos de caso em duas empresas, intituladas Beta e Delta. A partir dos resultados da análise e discussão foi observado que tais empresas não aplicam ferramentas de análise de falhas potenciais e nem Lista de Verificação durante a execução das tarefas. Sendo assim, foi indicada a aplicação da Ferramenta de Análise de Falha (FMEA) na fase de instalação dos equipamentos do sistema BCS.

**Palavras Chave:** Petróleo. Produção. Bombeio Centrífugo Submerso

## 1. Introdução

Consoante Thomas (2001), no Brasil, os campos terrestres têm uma participação de cerca de 5% da produção de petróleo total, espalhados numa grande extensão territorial, compostos por poços que apresentam métodos de elevação natural e artificial de petróleo, sendo os principais tipos: o poço Surgente (S); Gás *Lift* (GL); Bombeio Mecânico (BM); Bombeio de Cavidades Progressivas (BCP) e Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), foco da pesquisa.

O método BCS necessita de cuidados especiais na operação dos equipamentos, devido aos riscos de contaminação do óleo lubrificante dielétrico, bomba com baixa eficiência, entupimento da admissão (*intake*), travamento/prisão ou quebra do eixo e dos impulsores da

bomba centrífuga por decantação/deposição de areia, furo da tubulação ou da carcaça/camisa dos equipamentos do sistema BCS por corrosão e/ou incrustação, falha da vedação (orings - selo mecânico) do protetor e do motor, falhas nas emendas dos cabos elétricos trifásicos do motor, baixa isolamento e/ou aquecimento do motor e do cabo elétrico durante a operação, que podem impactar o desempenho da produção (OLIVEIRA, 2006; SLACK, 2007 e AFFONSO, 2006).

Coloca-se, portanto como questão de pesquisa a verificação de quais as ferramentas e os métodos são aplicáveis para identificar as falhas potenciais e propor melhorias na instalação dos equipamentos do sistema BCS em poços dos campos produtores de petróleo da Bahia utilizados pelas empresas Beta e Delta.

Este trabalho, portanto, apresenta estudos de caso de empresas que atuam na indústria do petróleo, através de instalação de equipamentos do sistema BCS em poços produtores de fluido multifásico e é realizada uma comparação entre as ferramentas e métodos de análise de falhas e sua aplicabilidade nos casos das empresas pesquisadas visando o aprimoramento do uso dos equipamentos e da melhoria do desempenho do sistema BCS.

## **2. Metodologia**

### **2.1 O método de análise de falhas FMEA**

Affonso (2006) caracteriza a falha de um componente de um equipamento quando ele não é mais capaz de executar a sua função de segurança. Já uma falha prematura é aplicável se o defeito ocorrer dentro do período de vida útil do componente a qual deve ser definida como critério de projeto e associada a um modo de falha específico, como uma fadiga superficial de um rolamento, desgaste da sede de selo mecânico, entre outros. A análise dessas falhas deve determinar os fatores que impediram que todas as fases da vida do equipamento fossem cumpridas com sucesso.

A técnica FMEA está estruturada para identificar:

- Possíveis modos de falhas;
- Efeitos de cada modo de falha;
- Causas dos modos de falhas;
- A severidade/gravidade do efeito;
- A ocorrência da falha (frequência);
- A ocorrência da falha;
- O índice de risco;

- Recomendações para elaborar o plano de ação.

Para Carpinetti (2010) e Filho (2011), o principal benefício da adoção do FMEA é o estabelecimento de uma sistemática de análise de falhas reais e potenciais, das causas e dos meios empregados para evitar ou detectar essas falhas, além de estabelecer um critério objetivo de priorização de ações de melhoria conhecido como RPN (Número de prioridade de risco).

Portanto, a partir dessas análises, torna-se relevante propor a aplicação de uma das ferramentas estudadas na instalação dos equipamentos do sistema de BCS das empresas Beta e Delta.

## **2.2. Os casos das empresas Beta e Delta**

A fim de pesquisar e descrever as práticas de gestão das empresas Beta e Delta foi utilizado um instrumento de coleta de dados roteiro de entrevista semiestruturado, elaborado com perguntas específicas para os gestores e técnicos responsáveis pelos processos internos em estudo na fase de instalação do sistema BCS, com análise dos discursos.

Cada grupo de perguntas de entrevista procurou identificar e caracterizar os aspectos importantes das práticas de utilização de ferramentas e métodos de análise de falha no sistema BCS. O processo da coleta de dados foi realizado através de perguntas específicas aplicadas em duas etapas, conforme a seguir:

- O primeiro grupo de perguntas para identificação do entrevistado de cada empresa;
- E o segundo grupo de perguntas para atingir os objetivos específicos da pesquisa;

Foi realizada uma observação direta nos processos e atividades produtivas durante a pesquisa de campo.

Foram entrevistados um gestor, três engenheiros e quatro técnicos da empresa Beta e um gestor, dois engenheiros e três técnicos da empresa Delta, todos detentores de grande experiência neste equipamento com uma participação média de 30 instalações do equipamento BCS. A unidade da empresa Beta, localizada na Bahia, que atua no ramo de negócio envolvendo sistema BCS possui um quadro funcional de cerca de 20 funcionários.

A empresa Beta tem sua matriz situada na cidade do Rio de Janeiro e à época da

Pesquisa possuía filiais em Macaé-RJ, Alagoas e Bahia, 100% brasileira. Fabricante de equipamentos, bombas e componentes para equipamentos de perfuração e produção de petróleo, também desenvolve projetos, fabricação de produtos e serviços para diversos segmentos industriais.

Está certificada na norma NBR ISO 9001:2008, aplicando os requisitos da gestão da qualidade e requisitos e especificação API Spec Q1 na gestão global da organização, com objetivo de garantir a melhoria contínua dos seus processos.

A empresa Delta é 100% brasileira, fundada em 1994, especializada na prestação de serviços técnicos para a indústria petrolífera e possuía à época da pesquisa uma estrutura industrial pronta para abrigar variados tipos de serviços na matriz situada na cidade de Macaé-RJ. A filial da Bahia era a responsável pela operação de sistemas BCS em campos de clientes. O sistema de gestão global da empresa está estruturado com base nas normas ISO 9001 (gestão da qualidade), ISO 14001 (gestão ambiental) e no OHSAS 18001 (gestão da segurança e da saúde).

A pesquisa foi estruturada em quatro etapas, sendo a primeira sobre o processo de levantamento das informações das características dos poços; a segunda buscou identificar os procedimentos, custos e indicadores de desempenho no acompanhamento da operação do sistema BCS; a terceira mapeou os principais problemas identificados durante a operação do sistema BCS e a quarta etapa procurou identificar os procedimentos, responsáveis, competências necessárias, ferramentas de análise de falhas utilizadas pelas empresas, dificuldades encontradas no uso, documentação de análise gerada e recomendações de melhoria contínua em futuras análises de falhas.

### **3. Resultados e Discussão**

Algumas das informações disponibilizadas pelos clientes das empresas pesquisadas não são satisfatórias e em alguns casos divergem, para uma definição com qualidade da composição de equipamentos e acessórios do sistema BCS, que venha caracterizar a eficácia na sua instalação.

As informações históricas disponibilizadas pelas empresas concessionárias ou operadoras de campo de petróleo, quando apresentam desvios de qualidade ou não são

realizadas de forma sistemática, contribuem para a falha prematura do sistema BCS por falta de submersão de fluido nos equipamentos, contribuindo principalmente para a queima do motor e/ou baixa isolamento do cabo elétrico por aquecimento, já que a carcaça do motor opera com alta temperatura e, para realizar a refrigeração do motor, os fluidos devem passar pela carcaça do motor e efetuar a troca de calor para reduzir a temperatura da sua carcaça metálica.

Há escassez de informações sobre as características agressivas dos fluidos produzidos do poço/jazida, devido à falta de sistemática em laboratório, como abrasividade (concentração de areia na emulsão), salinidade, acidez, presença de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, estes aceleram a redução da eficiência e do ciclo de vida dos equipamentos e acessórios do sistema BCS, por desgastes, corrosão e incrustação nas ligas metálicas da tubulação da coluna de produção. Como os poços são maduros, com cerca de 30 anos em produção, não há muitos dados históricos dos poços, principalmente referente aos fluidos produzidos e em alguns casos, não há um grau de certeza de que os dados representem a realidade dos poços e fluidos produzidos.

Outro ponto a ser observado em poços antigos é o grau de corrosão e incrustação identificada nos trechos da tubulação do revestimento do poço próximo do reservatório/jazida cujo contato com os fluidos agressivos, caracteriza riscos de prisão ou dificuldade de passagem dos equipamentos durante a intervenção de SPT no poço.

Desta forma, para os entrevistados, as informações disponibilizadas pelas empresas concessionárias e operadoras de campos produtores de petróleo, para auxiliar na composição e acompanhamento do sistema BCS, não são suficientes e em alguns casos têm baixo nível de qualidade.

Isto contribui para a baixa eficiência, aumento de perdas de produção e redução do ciclo de vida dos equipamentos. Isso ocorre porque, no passado, as empresas não tinham tecnologias para mapear todos os dados importantes desde a fase de perfuração até o acompanhamento da operação do poço, nem procedimento, nem pessoas com cultura para o detalhamento e gestão de informações históricas de cada poço.

Com base nas entrevistas dos técnicos de ambas as empresas e análise dos procedimentos operacionais (PO) da empresa Delta, foram definidas como prioritárias as seguintes atividades na instalação do sistema BCS:

- Fazer emenda do cabo chato do motor (*flat cable*) com o cabo chato ou redondo da coluna de produção;
- Conectar o *flat cable* no motor;
- Completar óleo dielétrico do motor e protetor para extrair ar;
- Fixar com abraçadeiras metálicas o cabo chato elétrico no motor e cabo chato ou redondo na coluna de tubos de produção;
- Medir a continuidade da corrente do motor e à cada dez tubos instalados;
- Instalar transformador de tensão;
- Instalar inversor de frequência / painel de controle;
- Instalar caixa de junção/ventilação de gases e conectar cabos elétricos (chato ou redondo);
- Concluir instalação elétrica dos equipamentos/componentes de superfície do poço;
- Parametrizar as variáveis de controle no inversor de parada por *overload*, *underload*, *overvolt*, *undervolt*, *volt unbalance*, *corrence unbalance* e o tempo de rearme/start do motor do sistema BCS;
- Dar partida no sistema BCS;
- Monitorar a corrente elétrica de operação;
- Analisar paradas no sistema BCS por *overload* (sobrecarga), *underload* (subcarga) ou por outros motivos a partir de dados acumulados no controlador lógico programável (CLP) do inversor de frequência;
- Acompanhar e analisar teste de produção bruta com base na curva da bomba; e
- Analisar registro do nível estático, nível dinâmico e submergência dos equipamentos de subsuperfície do sistema BCS.

As entrevistas sugerem que para acompanhar e monitorar o comportamento de operação do sistema BCS após a instalação em poço produtor de petróleo, as empresas concessionárias e operadoras de campos de petróleo devem definir, acompanhar e analisar alguns indicadores de desempenho mensal do sistema BCS para minimizar as falhas potenciais, como os listados a seguir:

- Teste mensal de produção igual ao range ótimo da bomba;
- Nível dinâmico mensal do poço testado;
- Corrente de operação por poço;
- Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) do poço;
- Perda de produção bruta (óleo+água);
- Perda de produção de óleo do poço; e
- Custo de elevação de petróleo pelo sistema BCS.

À época da pesquisa, as empresas Beta e Delta tinham contratos com empresas concessionárias e operadoras de campos produtores de petróleo da Bahia, de instalação do sistema BCS em 20 poços (empresa Beta), com tempo médio em operação de dois anos e a empresa Delta tem contrato para 55 poços, com sistema BCS operando há um ano.

O processo de análise de falha potencial na instalação do sistema BCS em poço produtor de petróleo está, como apontam as entrevistas, definido no procedimento de ação corretiva e preventiva da documentação do Manual de Qualidade (MQ) da empresa Beta, o qual indica a utilização da ferramenta e método de Análise Preliminar de Risco (APR) para este fim, assim como definido no Manual do SGI da empresa Delta, através da aplicação do diagrama de causas e efeitos no tratamento das anomalias.

O padrão define que a ferramenta e método de análise de falha potencial na instalação do sistema BCS é de responsabilidade dos engenheiros, técnicos de eletricidade e de instrumentação. Conforme os entrevistados, todos os envolvidos nesse processo são formados, capacitados, habilitados nas áreas de eletricidade, instrumentação, automação, receberam treinamento teórico na norma regulamentadora nº 10 e treinamento no local de trabalho em instalação, acompanhamento e monitoramento do sistema BCS em poço produtor de petróleo. Contudo, não foi apresentada uma evidência da utilização prática do estudo e análise de falha potencial na instalação do sistema BCS com aplicação do formulário de APR.

Os dados de entrevista revelam ainda que tanto a empresa Beta quanto a empresa Delta utilizam de forma sistematizada as ferramentas básicas da qualidade, como: o gráfico de Pareto, diagrama de *Ishikawa* (causa e efeito), gráfico de dispersão, histograma, *brainstorming* e outras, para auxiliar na análise de falha potencial através da técnica APR e do formulário de tratamento de anomalias.

Dada a importância e custo médio de aquisição de um sistema de BCS foi proposto aplicar o método FMEA, devido à possibilidade de adaptação e aplicação da técnica na análise de falha potencial e real na instalação do sistema BCS, por causa da geração de conhecimento com o resultado da análise e disseminação por toda organização, e pela possibilidade de ser aplicado nos diversos negócios das empresas.

Nesse sentido, a ferramenta de análise de falha FMEA contempla os principais questionamentos para identificar os modos e efeitos de falhas potenciais e recomendações para minimizar ou eliminar a causa potencial. As análises são realizadas por uma equipe multidisciplinar formada por técnicos e engenheiros das empresas Beta e Delta, com conhecimento e experiência na instalação do sistema BCS e na utilização da ferramenta FMEA, sendo considerados todas as fases e componentes dos equipamentos de subsuperfície,

superfície e dos serviços de instalação do sistema BCS.

Na análise comparativa entre os formulários de FMEA's do sistema BCS da empresa Beta e empresa Delta foram identificadas novos modos de falhas, causas, controles e ações recomendadas nos formulários do FMEA da empresa Delta, sendo:

- Na análise do motor BCS, foram identificados os seguintes novos modos de falha: *undervolt*, *overvolt*, *volt unbalance* e *current unbalance* durante o acionamento do BCS, tendo como causas a falha de enrolamento do motor e/ou transformador, e ou falha na rede elétrica, com recomendação de controlar e monitorar os dados de operação dos equipamentos e ajustar o *Set Point* no inversor de frequência, conforme formulário do FMEA.
- No modo de falha por contaminação do óleo dielétrico do protetor e do motor da BCS foi mapeado a nova causa: não extrair todo ar contido no interior do protetor e do motor e as ações para completar óleo dielétrico desses equipamentos e aplicar LV com tarefa de inversão dos *plugs* de completar óleo para extrair ar dos mesmos.
- Quanto ao modo de falha por baixa isolamento do cabo elétrico chato e redondo da empresa Delta foram identificadas as seguintes novas causas: danos, moessa, incrustação e/ou corrosão no revestimento do poço e uma nova ação para a sonda descer uma coluna de tubos de operação com raspador e sapata na extremidade, para condicionar o revestimento do poço a ser equipado com o sistema BCS.

A partir desses resultados e das ações dos demais formulários do FMEA foi recomendada a inclusão das mesmas nos procedimentos da empresa Beta e incluso na Lista de Verificação (LV), a ser utilizada na fase de instalação dos equipamentos no poço produtor de petróleo pelas empresas Beta e Delta, com destaque para a:

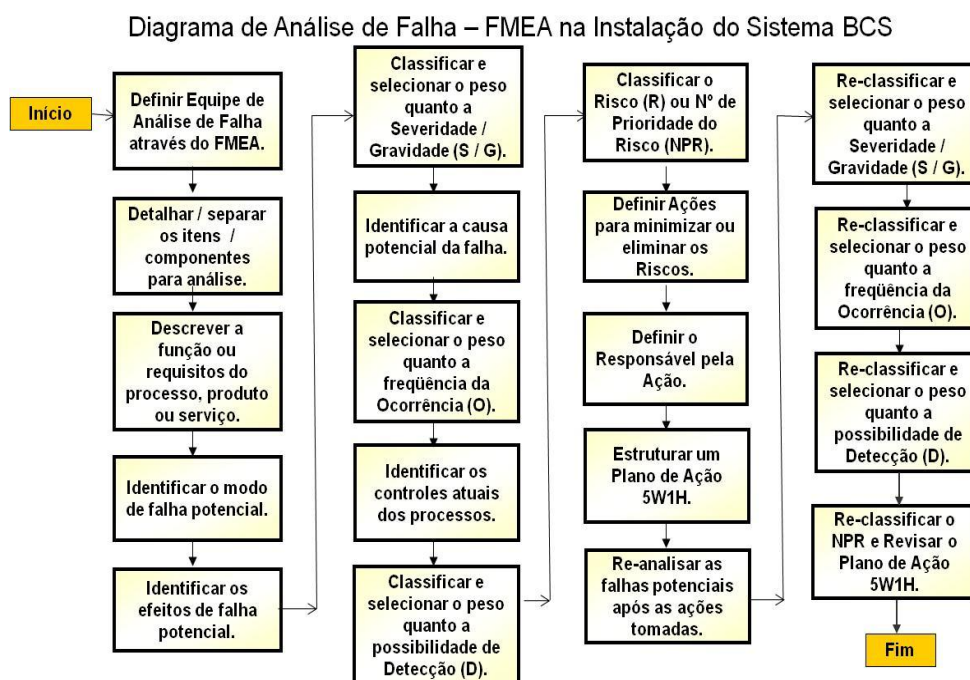
- Parametrização do inversor de frequência na superfície com as variáveis de controle de parada do sistema BCS por *overvolt*, e *undervolt*;
- Parametrização do inversor de frequência na superfície com as variáveis de controle de parada do sistema BCS por *volt unbalance* e *current unbalance*;
- Extrair 100% de ar do óleo dielétrico do motor e do protetor do sistema BCS, completando o óleo desses equipamentos no momento da instalação; e
- Esperar por cinco minutos de estabilização do óleo dielétrico nos equipamentos e recompletar, pela segunda vez, para garantir que o ar tenha sido expurgado.

A partir das análises, resultados e observações na fase de aplicação dos formulários de FMEA foi proposta e elaborada uma Lista de Verificação (LV) estruturada em três etapas de atividades e tarefas a serem executadas, que tem como objetivo garantir que a equipe de técnicos responsáveis pela instalação do sistema BCS não esqueçam do programa de dimensionamento (projeto) de instalação em poço, ferramentas necessárias, equipamentos, acessórios, cuidados a serem tomadas e procedimentos/atividades/tarefas obrigatórios nesse processo, através do preenchimento e assinatura dos



responsáveis na LV, durante a execução dos serviços de instalação da BCS no poço produtor de petróleo na fase de intervenção com SPT.

No entanto, após a equipe de análise dominar a ferramenta de análise de falha, ter conhecimento e experiência no sistema/processos a ser analisado, o próximo passo das empresas Beta e Delta será a definição e inclusão na matriz de padrões do Manual da Qualidade (MQ) e do Manual do SGI de um procedimento documentado com o diagrama de passo-a-passo para aplicação do FMEA na coleta de dados/informações, no preenchimento e análise das diversas fases do sistema BCS, ilustrado na Figura 1, para a identificação da causa raiz dos problemas/falhas e definição das recomendações, e assim minimizar ou eliminar as falhas potenciais e alcançar a melhoria contínua, incluindo também um modelo de tabela/planilha do FMEA, ambos anexos ao padrão.



**Figura 1:** Diagrama com o passo-a-passo de análise de falha – FMEA na instalação, acompanhamento e monitoramento do sistema BCS das empresas Beta e Delta.

Elaborado pelos autores. Dados da pesquisa

Desta forma, as tabelas estruturadas para aplicação da FMEA, a elaboração, aprovação e treinamento no procedimento facilitam o entendimento de todos os envolvidos na utilização da ferramenta de análise de falha, comunica a autoridade, responsabilidade e atribuições nas diversas fases da análise, conceitos, critérios, conteúdos e carga horária de treinamento e de comunicação das informações.

## 6. Considerações Finais

Através do roteiro de entrevista foi possível concluir que as empresas Beta e Delta não utilizam ferramentas e métodos de análise de falha potencial para tomar ações preventivas no processo de instalação dos equipamentos do sistema BCS. Estas utilizam apenas ferramenta de análise de falha ocorrida, seguindo a definição do Manual da Qualidade e do SGI das empresas estudadas, após uma falha/quebra do sistema BCS, através da aplicação da Análise Preliminar de Risco (APR) e de tratamento de anomalias, caracterizando um procedimento de ação corretiva.

Análises dos processos de instalação do sistema BCS foram realizadas por técnicos e engenheiros das empresas Beta e Delta através da aplicação da ferramenta FMEA e, com as ações recomendadas para eliminar/minimizar os riscos, foi proposta e elaborada uma lista de verificação (LV), para garantir que todos os possíveis riscos que porventura caracterizarem uma falha no sistema BCS sejam observados de forma proativa durante a instalação dos equipamentos.

A aplicação da ferramenta de análise de falha FMEA atingiu o seu objetivo porque estratificou em fases o sistema BCS para análise e propiciou a identificação das falhas potenciais, causas, número de prioridade de risco e ações recomendadas para eliminar a causa raiz de falha dos equipamentos do sistema BCS e serviços.

## 7. Referências

AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. 2. ed. – Rio de Janeiro: Qualitymark, 2006.

CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. **Gestão de qualidade: conceitos e técnicas**. São Paulo : Atlas, 2010.

FILHO, Frederico Wergne de Castro Araújo. **Automação da cadeia de suprimentos das empresas montadoras de microcomputadores via tecnologia RFID**. 2011, 145f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. Salvador - BA, 2011.

OLIVEIRA, Pedro da S. **A operação do Bombeamento Centrífugo Submerso**. Apostila. Petrobras. Macaé: 2006.

SLACK, Nigel. et ali. **Administração da Produção**. 2. ed. 7. reimp. São Paulo, Atlas, 2007.  
THOMAS, J E. et al (organizador). **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro : Interciência, PETROBRAS, 2001.