

Aplicação de FMEA para Definição de Estratégias de Manutenção em um Sistema de Controle e Instrumentação de Turbogeneradores

Cristiano Herpich (PPGEP/UFRGS)
Flávio Sanson Fogliatto (PPGEP/UFRGS)

Resumo

O uso de técnicas avançadas na gestão da manutenção vem proporcionado cada vez mais confiabilidade e segurança nos sistemas de produção industrial, resultando em uma maior disponibilidade dos equipamentos a um menor custo de manutenção. A Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM - Reliability Centered Maintenance) é um método utilizado para planejamento de manutenção que foi desenvolvido inicialmente na indústria aeronáutica e, posteriormente, adaptado para diversas outras indústrias e instituições militares. Este artigo apresenta o estudo e desenvolvimento de um método de análise de risco baseado no modelo de Análise de Criticidade e Modo de Efeito de Falhas (FMECA - Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), identificando e classificando os equipamentos críticos de um sistema de controle e instrumentação de um turbogerador que apresentam maior grau de risco em caso de falha, em termos de segurança, meio ambiente, perdas de produção e custos de manutenção, e de acordo com sua importância definir a melhor estratégia de manutenção. Os diversos passos previstos e resultados esperados, serão descritos em conjunto com os benefícios estratégicos obtidos com a implantação desta metodologia.

Palavras chave: Manutenção, RCM, FMECA, Estratégia de Manutenção.

1 Introdução

A mecanização e automação das indústrias criaram um cenário onde as máquinas se tornaram um dos principais recursos produtivos. Porém, a gestão da manutenção dessas máquinas, muitas vezes é tratada apenas com ações corretivas. Tal estratégia acaba sendo responsável por uma queda vertiginosa na eficiência da produção, pois com a incidência constante de avarias, os recursos ficam imobilizados por mais tempo, prejudicando a produtividade.

O uso de técnicas avançadas na gestão da manutenção vem proporcionando, cada vez mais, controle e segurança nos processos produtivos, acarretando no aumento da produtividade visto que garantem uma maior disponibilidade dos equipamentos a um menor custo de manutenção. Segundo Moubrey (2000), no velho paradigma da manutenção, o objetivo era otimizar a disponibilidade da planta ao mínimo custo, no novo paradigma manutenção afeta todos os aspectos do negócio: segurança, integridade ambiental, eficiência energética e qualidade do produto.

Uma das soluções para melhoria no controle dos riscos de falhas é a manutenção. Atualmente a NBR 5462 define manutenção como sendo as ações que mantém ou restabelecem um equipamento ou sistema, garantindo que o mesmo possa desempenhar sua função requerida. A manutenção pode ser classificada em corretiva, preventiva e preditiva. A manutenção corretiva é uma manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida, podendo ser classificada como não planejada ou planejada. Já a manutenção preventiva é a manutenção efetuada em intervalos pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritivos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. E a manutenção preditiva permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, realizando a manutenção somente quando houver necessidade.

Hoje grande parte das empresas do setor petroquímico, em função do seu alto consumo energético, possui um sistema de geração de energia elétrica próprio. A empresa onde será aplicada a metodologia proposta neste artigo possui um sistema composto por dois turbogeradores a vapor e um turbogerador a gás/óleo, que aproveitam o vapor super-aquecido e o óleo combustível provenientes do seu processo industrial, e a boa relação custo × benefício do gás natural, para produzir energia elétrica através do sistema de cogeração. Estes equipamentos, que são de extrema importância e alta criticidade para o processo industrial, utilizam modernos e robustos instrumentos de controle e intertravamento. Porém não existe uma gestão de manutenção adequada à realidade atual. Isto torna impossível definir a estratégia de manutenção ideal para cada instrumento, conforme o seu grau

de risco, custo e importância no processo industrial.

O objetivo deste artigo é apresentar a aplicação de uma ferramenta FMEA que irá prover subsídios para uma classificação de instrumentos e proposição de estratégias de manutenção adequadas para cada caso, com base em uma visão focada na confiabilidade e criticidade de cada instrumento utilizado no controle e automação de turbogeradores. Com a aplicação desta ferramenta, a integridade e confiabilidade dos ativos durante toda sua fase de operação será preservada, alterando-se o tipo de manutenção e o mecanismos de disparo das intervenções conforme a prioridade e disponibilidade de cada instrumento, com base em históricos, monitoramentos e análises das reais condições de operação dos ativos.

Este artigo está organizado em cinco seções incluindo a presente introdução. Na seção de Referencial Teórico aborda-se os fundamentos do método e ferramenta de RCM utilizado. A terceira seção apresenta uma descrição dos Procedimentos Metodológicos aplicados na forma de fluxograma, descrevendo suas etapas. A quarta seção apresenta o estudo de caso da aplicação da ferramenta FMEA e discute os resultados encontrados. Finalmente, a quinta seção apresenta as considerações finais e conclusões.

2 Referencial teórico

2.1 Métodos e ferramentas de Manutenção Centrada em Confiabilidade

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5462, 1994), a manutenção é definida como "combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em estado no qual possa desempenhar uma função requerida".

Dhillon (2006) apresenta manutenção como: "todas as ações necessárias para manter um ativo ou restaurá-lo, para uma condição satisfatória de operação". Kardec e Nasfic (2009) complementam que além de executar sua função, a manutenção deve garantir a confiabilidade e disponibilidade do item físico ou instalação, atendendo ao processo com segurança, preservando o meio-ambiente e com custos adequados.

Ao longo das últimas décadas as estratégias de manutenção evoluíram a partir da técnica de manutenção corretiva por quebra para estratégias mais sofisticadas, como monitoramento de condições e manutenção centrada na confiabilidade (KHAN E HADDARA, 2004). Outro elo desta cadeia de progresso foi recentemente adicionado pela introdução de um método base-risco junto à manutenção. Esta abordagem tem sido sugerida como uma nova visão para a gestão de integridade de ativos (ASME, 2000).

2.1.2 Análise de Modos e Efeitos de Falhas

Mais conhecida pela sigla em inglês FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), é uma técnica que ajuda a identificar e priorizar falhas potenciais em equipamentos, sistemas ou processos. FMEA é um sistema lógico que hierarquiza as falhas potenciais e fornece recomendações para ações que visam evitá-las através de técnicas de manutenção (SMITH e KEITH, 2008). De acordo com os autores, as falhas encontradas através da técnica FMEA são priorizadas a partir da criticidade das causas, utilizando o índice RPN (Grau de Prioridade de Risco) que é composto pelo produto dos seguintes indicadores: a severidade (gravidade do modo de falha, obtida pela média aritmética dos valores do impacto do modo de falha em termos de segurança, meio-ambiente, produção e custo), a ocorrência (frequência com que o modo de falha ocorre) e a detecção (grau de facilidade para detectar a falha). Para indicar a gravidade da falha, sua frequência e grau de detecção adota-se uma escala de 1 a 10, onde 10 sinaliza a situação de maior intensidade. Define-se o RPN como sendo o produto desses três indicadores.

Além da sigla FMEA, é comum a utilização da sigla FMECA, que significa Análise de Criticidade, Modos e Efeitos de Falhas. A principal diferença entre FMEA e FMECA reside no fato que a primeira é uma técnica mais ligada ao aspecto qualitativo, sendo muito utilizada na avaliação de projetos, enquanto a segunda inclui o que se denomina Análise Crítica (CA). A Análise Crítica é um método quantitativo utilizado para classificar os modos e efeitos de falhas críticas levando em consideração suas probabilidades de ocorrência.

A identificação da função de cada componente, seus modos potenciais de falha, seus efeitos e suas causas e, por consequência, a classificação dos graus de criticidade, são resultados da aplicação da ferramenta de Análise de Criticidade e Modo de Efeito de Falhas (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). Segundo os autores, no âmbito da MCC, a identificação do efeito da falha conduz a uma classificação de criticidade do componente como: (i) crítico, (ii) potencialmente crítico ou (iii) não crítico. Os itens críticos e potencialmente críticos devem ser incluídos nos programas de manutenção.

Os campos de aplicação da metodologia FMEA são amplos na área de MCC, e a literatura apresenta várias pesquisas e aplicações relacionadas ao uso da ferramenta, tais como Silva et al. (2008) que revelam a importância da gestão de equipamentos utilizando a técnica de análise de risco FMEA para revisar o programa de manutenção de equipamentos críticos de um gerador de vapor (caldeira flamotubular), onde com os resultados da análise em questão ofereceu maiores subsídios para o aumento da confiabilidade da caldeira, contribuindo, assim, para a qualidade do processo produtivo e reduzindo os possíveis impactos ambientais gerados pela possível ocorrência dos modos de falha nos componentes do sistema.

Coelho et al. (2011) desenvolvem a metodologia em uma extrusora polimérica, prevendo a análise de falhas e a aplicação das demais técnicas da MCC, onde através da identificação dos itens críticos do sistema definiram um plano de manutenção com o intuito de renovar a vida útil do equipamento. Dentre as tarefas propostas, foi definida a necessidade de uma manutenção preventiva geral a cada cinco anos, e a substituição dos itens principais de um dos sistemas críticos, visando o aumento da disponibilidade e confiabilidade do equipamento. Da mesma forma Lino (2010) constatou que após as implantações de ações previamente planejadas e extraídas de uma análise FMEA em turbinas a vapor de uma usina de açúcar e bioenergia, obteve diversos ganhos como redução de horas de equipe de manutenção, diminuição de paradas corretivas não planejadas para regulação de turbinas, redução de troca de peças, diminuição de possíveis riscos de acidentes, redução de gastos com consultores e especialistas para análise de falhas nas turbinas por desalinhamentos e falhas na lubrificação de acoplamentos, entre outros.

Guimarães e Lapa (2004) que aplicaram a metodologia de análise de efeitos e modo de falha extensa (FMEA) que usa o número de prioridade de risco (RPN) em um Sistema de Controle de Volume e Químico (CVCS) usado em usinas nucleares, para escalar as características dos parâmetros de risco do sistema e o compararam a um sistema lógico de inferência Fuzzy para estimar o risco do parecer obtido pela utilização dos escores de opinião de especialistas. Assim como Xu et al. (2002) que apresentam o método baseado em lógica Fuzzy para uma melhor aplicação da ferramenta FMEA, utilizando um sistema de turbogerador a diesel para ilustrar a viabilidade do método proposto. Já Arabian-Hoseynabadi et al. (2010) aplicaram a análise FMEA no estudo de confiabilidade de vários sistemas de geração de energia diferentes. Eles compararam os resultados quantitativos com um conjunto de dados de campo de sistemas de turbinas eólicas reais, e os resultados ajudaram a estabelecer relações que são úteis para a confiabilidade das turbinas eólicas. Enquanto que Nord et al. (2009) tratam de uma análise de confiabilidade qualitativa através da ferramenta FMECA, que identifica e classifica as falhas e os riscos dos equipamentos críticos de uma turbina a gás de uma planta de geração de energia, onde os resultados do FMECA se mostraram interessantes para determinar como as falhas que se propagam através do sistema e os seus efeitos sobre o funcionamento do processo.

Xiao et al. (2011) estudaram a aplicação de FMEA para o caso de múltiplos modos de análise de falhas, concentrando-se no cálculo RPN. O estudo foi estendido pelo trabalho realizado por Pickard et al. (2005), que reviu o cálculo do RPN multiplicando-o por um parâmetro de peso, que caracteriza a importância da falha provocada no sistema. A eficácia do método é demonstrada com resultados numéricos. E Bevilacqua et al. (2000) propuseram uma metodologia baseada na integração entre uma FMECA modificada e uma simulação de Monte Carlo como um método para testar os pesos atribuídos à medida do RPN. O RPN modificado consistiu de uma soma ponderada de seis parâmetros (segurança, importância do equipamento para o processo, os custos de manutenção, a frequência de falhas, o tempo de inatividade devido às falhas e as condições de operação), multiplicada por um sétimo fator (a dificuldade de acesso da máquina), em que a importância relativa dos seis atributos foi estimada utilizando comparações em pares.

3 Método

Este item ilustra através de um fluxograma a metodologia utilizada para desenvolver a ferramenta RCM, descrevendo as etapas e diretrizes que sistematizam a elaboração do método proposto.

3.1 Fluxograma da Metodologia

O fluxograma da Figura 1 apresenta a sequência de passos propostas, com as etapas e ações necessárias para desenvolver a ferramenta e atingir os objetivos propostos.

Baseando-se nas diretrizes da metodologia de análise FMEA, para cada equipamento foram definidas alternativas de manutenção com base nas suas funções requeridas, na análise dos modos de falhas, sua criticidade e o risco associado à consequência de sua falha funcional, bem como os parâmetros de monitoramento e suas técnicas de avaliação, obtidas através de históricos de manutenção.

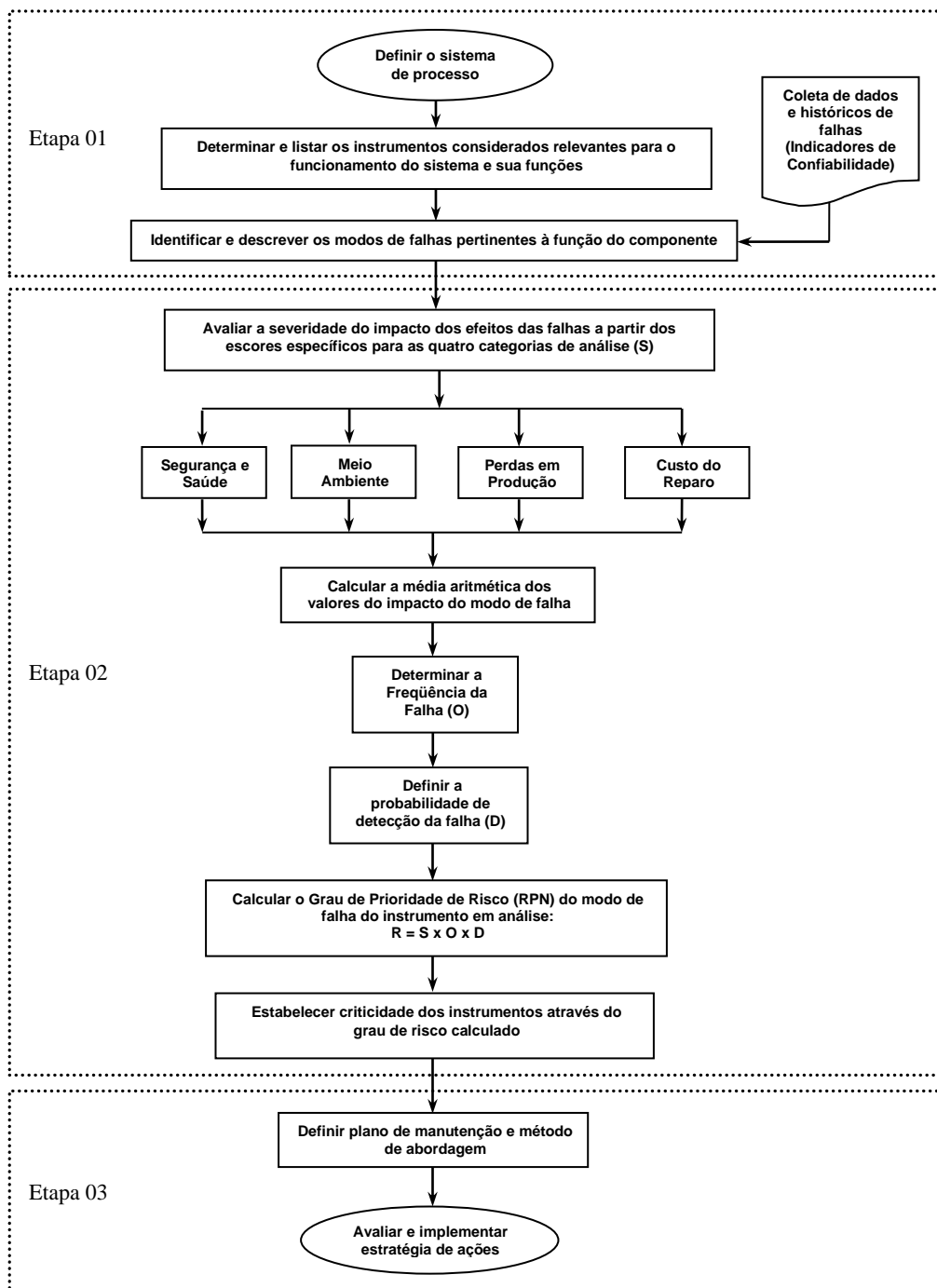


Figura 1: Fluxograma da metodologia aplicada no desenvolvimento da ferramenta

3.2 Descrição das Etapas e Ações Propostas

As etapas que compõe a metodologia aplicada e suas ações propostas são baseadas em critérios e matrizes, que podem ser obtidas através de referências bibliográficas, normas técnicas e critérios de Segurança, Saúde e Meio Ambiente (SSMA) em uso na empresa analisada. Essas etapas, apresentadas na Figura 1, são detalhadas nas subseções que se seguem.

3.2.1 Etapa 1 - Levantamento dos instrumentos do sistema, suas funções e modos de falha

Nesta etapa são listados todos os instrumentos que fazem parte do sistema de controle e automação do equipamento/processo selecionado para estudo, e que possuem um grau relevante de importância para sua integridade e perfeito funcionamento. Bem como suas funções e seus modos de falhas dominantes, conforme base de dados e históricos de manutenção do sistema.

3.2.2 Etapa 2 - Classificação da faixa de risco e criticidade dos instrumentos através do grau de prioridade de risco das falhas funcionais

Nesta etapa são definidos e avaliados a severidade e o impacto dos efeitos dos modos de falha dos instrumentos, com base em dados e históricos de falhas do sistema. Os efeitos são classificados nas seguintes categorias: Saúde e Segurança, Meio-Ambiente, Produção e Custo de Reparo.

Em cada categoria, se determina o grau de impacto dos modos de falha de cada instrumento no processo, usando a escala na Tabela 1 abaixo, cujos valores foram adaptados da norma IEC 60518:2006 *apud* Smith e Keith (2008). Na escala apresentada, leva-se em conta os impactos prováveis que uma dada falha funcional de um instrumento pode provocar no sistema; os impactos vão de catastróficos até sem impacto ou dano. Após a atribuição dos valores, se determina o grau de severidade do modo de falha pela média aritmética dos valores.

Tabela 1: Matriz de Efeito × Impacto

Efeito	Catastrófico 10	Crítico 8	Alto 6	Moderado 4	Baixo 2	Sem Impacto 1
Saúde/Segurança	Mais que 10 mortes	De 1 a 10 mortes ou acidentes incapacitantes permanentes	Uma Morte ou acidente incapacitante permanente	Acidente com afastamento	Acidente sem afastamento	Sem danos pessoais
Meio Ambiente	De grande magnitude e extensão, com danos irreversíveis	De alta magnitude e de difícil reversão, com risco de danos irreversíveis	De magnitude considerável e de difícil reversão	De magnitude considerável, mas reversíveis com ações mitigadoras	De pequena magnitude e reversíveis com ações imediatas	Sem danos ambientais
Produção	Impactos maiores que US\$1,000 MM	Impactos entre US\$0,501 MM e US\$1,000 MM	Impactos entre US\$0,201 MM e US\$0,500 MM	Impactos entre US\$0,051 MM e US\$0,200 MM	Impactos até US\$ 0,050 MM	Sem Impactos financeiros
Custo de Reparo	Custo maior que US\$500.000	Custo entre US\$500.000 e US\$100.000	Custo entre US\$100.000 e US\$50.000	Custo entre US\$50.000 e US\$10.000	Custo menor que US\$10.000	Sem custo de reparo

Fonte: (Adaptado de Smith e Keith, 2008)

Após é avaliada a frequência com que os modos de falha se apresentam no sistema utilizando a escala da Tabela 2.

Tabela 2: Matriz de Frequência de Falhas

Escore	Frequência de Falhas (O)
10	$O \leq 1$ Mês
9	$O \leq 6$ Meses
8	$O \leq 1$ Ano
7	$1 \text{ Ano} < O \leq 2 \text{ Anos}$
6	$2 \text{ Ano} < O \leq 4 \text{ Anos}$
4	$4 \text{ Anos} < O \leq 6 \text{ Anos}$
2	$6 \text{ Anos} < O \leq 8 \text{ Anos}$
1	$O > 8 \text{ Anos}$

Fonte: (Adaptado de Smith e Keith, 2008)

No passo seguinte será indicado o grau de facilidade de detecção do modo de falha, através da escala apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz de Detecção de Falhas

Escore	Detecção de Falhas (D)
10	Probabilidade improvável
9	Probabilidade remota
8	Probabilidade muito pequena
6	Probabilidade baixa
4	Probabilidade moderada de detecção
2	Probabilidade alta de detecção
1	Probabilidade muito alta de detecção

Fonte: (Adaptado de Smith e Keith, 2008)

Assim com os valores atribuídos de Severidade, Ocorrência e Detecção dos modos de falha, calcula-se o grau de prioridade de risco para cada item como o produto entre a frequência de ocorrência de um evento (O), o impacto ou magnitude das conseqüências potenciais deste evento (S) e sua probabilidade de detecção (D). No âmbito desta definição, o risco se traduz em um índice numérico adimensional, que varia de 0 a 1000. O valor de risco é então categorizado, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Matriz de Detecção de Falhas

RISCO	É o produto entre a frequência de ocorrência de um evento (O) e o impacto ou magnitude das conseqüências potenciais deste evento (S) e a sua probabilidade de detecção (D), caso o mesmo venha a ocorrer.			
	Alto	Médio	Baixo	Muito Baixo
	501-1000	101-500	51-100	0-50

Fonte: (Adaptado de Smith e Keith, 2008)

E na sequência se determinará a criticidade, que é um indicador adimensional da importância relativa de um instrumento ou equipamento de processo com relação aos objetivos do negócio da empresa, ou a magnitude das conseqüências decorrentes de sua eventual falha. A matriz de criticidade da Tabela 5 servirá de base para classificar os instrumentos em análise. Por exemplo, a criticidade será classificada com alta, se o grau de risco for superior a 500 e os indicadores de segurança/saúde, meio ambiente, produção e custo de reparo receberem avaliação 10.

Tabela 5: Matriz de Classificação de Criticidade

MATRIZ DE CRITICIDADE							
Criticidade		Faixa de Risco		Segurança / Saúde	Meio Ambiente	Produção	Custo de Reparo
A	Alta	R>500	-	S=10	S=10	S=10	S=10
B	Média	R>100	R≤500	S= 8	S= 8	S= 8	S= 8
C	Baixa	R>50	R≤100	S= 6	S= 6	S= 6	S= 6
D	Muito Baixa	R>10	R≤50	S= 4	S= 4	S= 4	S= 4
E	Não Classificada	-	R≤10	-	-	-	-

Fonte: (Adaptado de Smith e Keith, 2008)

3.2.3 Etapa 3 - Definição das técnicas de manutenção e dos métodos de abordagem

Com base na classificação de criticidade, foram estabelecidas abordagens e ações para cada uma das dimensões associadas à estratégia de manutenção, conforme apresentado na Tabela 6, que servirá de base para determinar o tipo de manutenção adequado a cada instrumento.

Tabela 6: Matriz de Estratégias de Manutenção

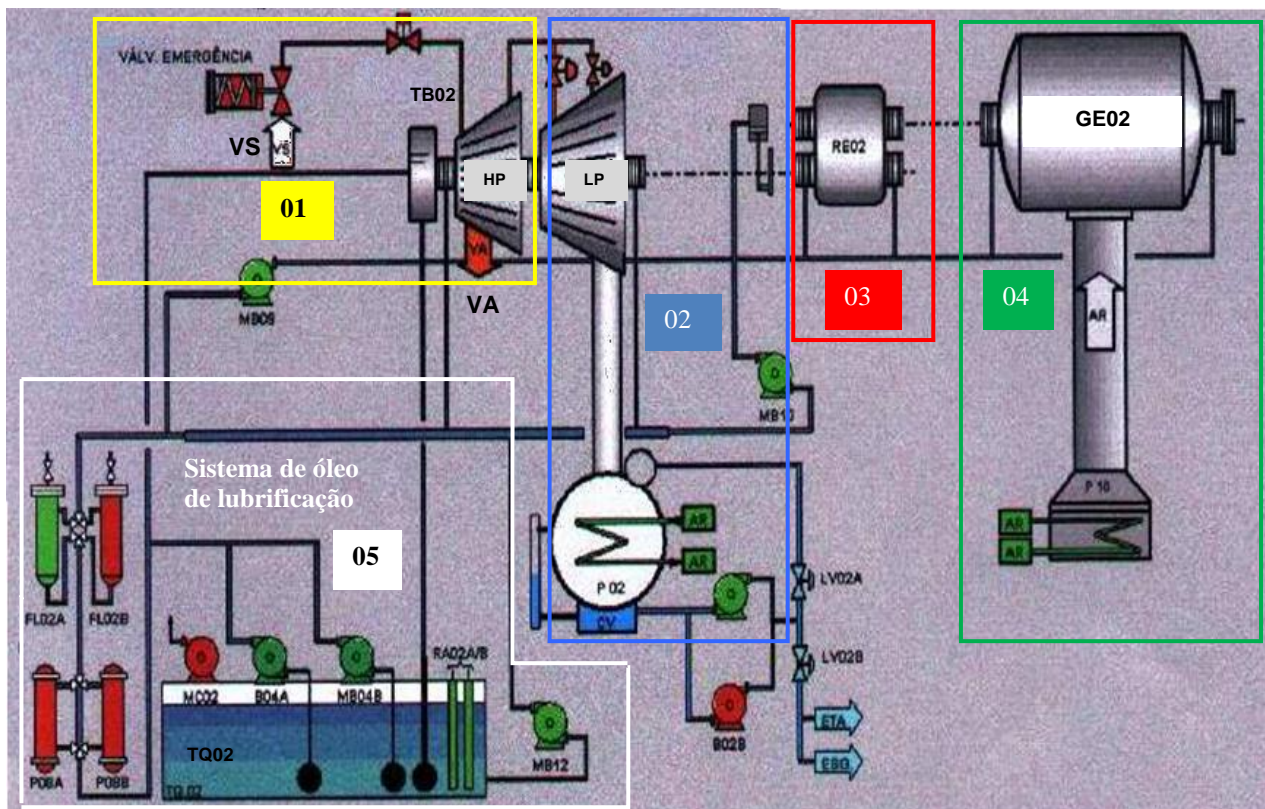
Classe de Criticidade	Tipo de Manutenção	Método de Abordagem
A	Preditiva (ou Preventiva quando não for possível a Preditiva)	Baseada por monitoramento e tempo
B	Preventiva e Inspeções	Baseada por tempo e condições
C	Corretiva (Planejada)	Baseada por inspeção
D	Corretiva (Não Planejada)	Baseada por quebra
E	Sem ação de manutenção	N/A

Fonte: (Adaptado de Smith e Keith, 2008)

4. Estudo de caso

O estudo da ferramenta FMEA proposta foi aplicado em um sistema de controle e instrumentação de um turbogerador de uma empresa do setor petroquímico. Turbogeneradores são máquinas puramente rotativas, que transformam um tipo de energia térmica ou mecânica contida em um fluido em energia elétrica. Os turbogeradores são compostos basicamente por três elementos básicos: uma turbina, um redutor e um gerador (LOPES, 2001).

O equipamento estudado consiste em um turbogerador (TG02) à vapor, do fabricante Siemens. A Figura 2 traz os cinco blocos de diagramas de processo do turbogerdor, com suas etapas de funcionamento e seus periféricos. No bloco 01 tem-se a turbina do tipo extração/condensação, com potência nominal de 21 MW a 7098 rpm, e o seu primeiro estágio, que admite Vapor Superaquecido (VS) a 120kgf/cm² na câmara de alta pressão, através da válvula de controle *High Pressure* (HP). Ao final deste estágio, se extrai Vapor de Alta pressão (VA) desta câmara de pressão e se utiliza a energia cinética produzida para gerar uma parcela da energia mecânica da turbina.



Fonte: Apostila de equipamentos rotativos (LOPES, 2001)

Figura 2: Diagrama de um turbogerador à vapor e seus periféricos

No bloco 02 tem-se o segundo estágio, que admite parte do VA, extraído do primeiro estágio através da válvula de controle Low Pressure (LP). O VA novamente se expande ganhando mais um pouco de energia cinética e, ao passar pelas palhetas das rodas, acaba gerando mais uma parcela de energia mecânica de rotação, repetindo assim o mesmo ciclo do estágio anterior, porém saindo com a extração de condensado de baixa pressão para o condensador de superfície (P02). No bloco 03 tem-se o redutor (RE02), que acopla os eixos da turbina (TB02) e do gerador (G02) através de engrenagens. Pelo lado da turbina, a velocidade de rotação (w_1) é aproximadamente 7200 rpm e a do gerador (w_2), de 1800 rpm, tendo-se assim um fator de redução (w_1/w_2) igual a quatro. No bloco 04 tem-se a etapa de geração de energia, na qual o gerador síncrono (G02) converte a energia mecânica aplicada ao seu eixo através de um torque e pela rotação do eixo da turbina em energia elétrica. Uma vez estando o gerador ligado à rede elétrica, sua rotação é controlada pela frequência da rede, pois a frequência da tensão trifásica depende diretamente da velocidade da máquina. No bloco 05 está ilustrado o sistema de óleo, composto por um reservatório (TQ02) e um conjunto de filtros e bombas de recirculação, que são responsáveis pela lubrificação de todas as partes mecânicas que sofrem atrito do turbogerador, tais como mancais, eixos e engrenagens da máquina.

O sistema de controle e automação do turbogerador à vapor estudado é composto basicamente por oito subsistemas:

- a) Subsistema de controle de velocidade: responsável pelo controle da velocidade da turbina, que através de sensores de velocidade verifica a rotação da máquina e atua diretamente na velocidade da turbina por meio das válvulas de controle de vapor HP e LP.
- b) Subsistema de controle de extração HP e LP: responsável pelo controle de extração de vapor da turbina, que busca o melhor rendimento através do equilíbrio de balanço entre o vapor superaquecido (VS), vapor de alta pressão (VA) e vapor de baixa pressão (VB).
- c) Subsistema de controle de óleo de lubrificação e comando: responsável pela circulação e controle do óleo de lubrificação das partes mecânicas do conjunto rotativo (mancais, eixos e engrenagens), e pelo controle do óleo de comando dos atuadores e sistemas hidráulicos do turbogerador.
- d) Subsistema de controle do condensador de superfície: responsável por garantir e manter as condições operacionais de pressão e nível do condensador de superfície.
- e) Subsistema de controle de temperatura: responsável pelo monitoramento e controle de temperatura das partes mecânicas do turbogerador, protegendo a máquina de eventuais sobreaquecimentos.
- f) Subsistema de controle de vibração e deslocamento: responsável pelo controle e monitoramento de vibração e deslocamento dos mancais e eixos do turbogerador, protegendo a máquina de eventuais problemas mecânicos.
- g) Subsistema de proteção digital do gerador: responsável pelo controle e proteção do gerador, de eventuais problemas de sobrecarga, sincronismo e térmicos.
- h) Subsistema de emergência: responsável pelo desarme imediato da turbina, devido a problemas ou condições anormais que possam vir a danificar ou comprometer o turbogerador.

4.1 Desenvolvimento e aplicação da ferramenta

Seguindo as etapas de implementação da ferramenta, o estudo de caso foi dividido em quatro etapas distintas apresentadas a seguir.

- 1) Identificados e definidos os instrumentos que fazem parte dos subsistemas de controle e instrumentação do turbogerador em estudo e suas funções, seus potenciais modos de falhas e seus efeitos, conforme visto na Tabela 7.

Tabela 7: Etapa 1 do Formulário FMEA

SISTEMA DE CONTROLE	INSTRUMENTO	FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO DA FALHA
CONDENSADOR DE SUPERFÍCIE	FT04	Medição de Vazão de Condensado de Vapor	Obstrução	Excesso de condensação de vapor
			Falha do transmissor	
			Vazamento	
	LSH02	Chave de Nível Alto do Condensador de Superfície	Descalibração	Perda de rendimento do condensador de superfície
			Sujeira	Quebra das palhetas da turbina
			Desgaste mecânico	Desarme indevido do turbogerador
Falha da chave				
LT02	Medição de Nível de Condensado	Obstrução	Excesso de condensação de vapor	
		Descalibração	Descontrole de nível de condensado	
		Vazamento		
ÓLEO DE LUBRIFICAÇÃO	PSLL34	Chave de Pressão Extra Baixa do Óleo de Lubrificação da Turbina	Falha do transmissor	Falta de lubrificação mecânica da turbina
			Desgaste	Desarme indevido do turbogerador
			Falha da chave	
	Descalibração			
	TT16	Medição de Temperatura do Óleo de Lubrificação	Falha do transmissor	Aquecimento do sistema mecânico do turbogerador
			Falha do sensor	Desgaste do sistema mecânico do turbogerador
Mau contato				
PROTEÇÃO DIGITAL DO GERADOR	SCR04	Relé de Sobrecarga de Tensão/Corrente	Descalibração	Desarme do sistema de rejeição de carga
			Curto circuito	
			Falha eletrônica	Falha no sistema de de sobrecarga
			Sobreaquecimento	Desarme indevido do turbogerador
			Mau contato	
			Falha no relé	
VELOCIDADE E VIBRAÇÃO E DESLOCAMENTO	ESV01	Válvula Shut-Down de Parada de Emergência da Turbina	Falha do atuador	Destruição do turbogerador
			Trancamento da válvula	Desarme indevido do turbogerador
			Falha suprimento de ar	
	SE02.1A	Sensor de Velocidade da Turbina	Falha na solenóide	Desarme indevido do turbogerador
			Falha no sensor	
	VE06.2	Sensor de Vibração do Lado Oposto ao Acoplamento da Turbina	Mau contato	Descontrole de velocidade do turbogerador
			Falha no sensor	Danos mecânicos na turbina por vibração
	VE12.1	Sensor de Vibração do Lado Acoplado do Redutor-Gerador	Mau contato	Desarme indevido do turbogerador
			Falha no sensor	Danos mecânicos no redutor por vibração
	ZE04.2	Sensor de Deslocamento Axial do Redutor	Mau contato	Desarme indevido do turbogerador
Falha no sensor			Danos mecânicos no redutor por deslocamento axial	
			Mau contato	Desarme indevido do turbogerador

2) Coletados os dados e históricos referentes às quebras e falhas ocorridas do equipamento e seus instrumentos, bem como as periodicidades de manutenção, com apoio do Sistema Informatizado de Gerenciamento de Manutenção (CMMS) utilizado pela empresa, com base nos registros dos últimos 6 anos. Aplicado a ferramenta FMEA avaliando e determinando os impactos dos modos de falha, suas frequências e suas probabilidades de ocorrência. Calculando assim os graus de prioridade de risco de cada instrumento e seus modos de falha, classificando por fim a faixa de risco e criticidade de cada ativo, conforme segue na Tabela 8.

Tabela 8: Etapa 2 do Formulário FMEA

INSTRUMENTO	SEGURANÇA / SAÚDE	MEIO AMBIENTE	PRODUÇÃO	CUSTO DE REPARO	SEVERIDADE DE IMPACTO (S)	FREQUÊNCIA DE FALHA (O)	DETECÇÃO DE FALHA (D)	RPN	GRAU DE RISCO	CRITICIDADE INSTRUMENTO
FT04	1	2	1	1	1,25	4	4	20	Muito Baixo	D
	1	2	1	1	1,25	1	2	2,5	Muito Baixo	
	1	2	1	1	1,25	4	2	10	Muito Baixo	
	1	1	2	1	1,25	1	6	7,5	Muito Baixo	
LSH02	4	2	8	10	6	4	9	216	Medio	A
	4	2	8	10	6	2	9	108	Medio	
	1	1	6	2	2,5	6	4	60	Baixo	
	1	1	6	2	2,5	1	6	15	Muito Baixo	
LT02	1	2	1	1	1,25	7	6	52,5	Baixo	C
	1	2	1	1	1,25	4	4	20	Muito Baixo	
	1	1	1	1	1	2	2	4	Muito Baixo	
	1	1	1	1	1	1	2	2	Muito Baixo	
PSLL34	2	1	8	10	5,25	4	6	126	Medio	A
	1	1	6	2	2,5	2	2	10	Muito Baixo	
	1	1	4	2	2	2	2	8	Muito Baixo	
	1	1	4	2	2	4	6	48	Muito Baixo	
TT16	1	1	2	6	2,5	4	4	40	Muito Baixo	B
	1	1	2	6	2,5	4	6	60	Baixo	
	1	1	6	8	4	2	6	48	Muito Baixo	
	1	1	6	8	4	2	8	64	Baixo	
SCR04	4	1	10	8	5,75	1	10	57,5	Baixo	A
	1	1	10	6	4,5	4	6	108	Medio	
	1	1	2	4	2	2	4	16	Muito Baixo	
	1	1	6	2	2,5	2	9	45	Muito Baixo	
ESV01	1	1	6	2	2,5	4	9	90	Baixo	A
	8	4	8	10	7,5	2	8	120	Medio	
	8	6	8	10	8	4	9	288	Medio	
	1	1	6	2	2,5	1	4	10	Muito Baixo	
SE02.1A	1	1	6	2	2,5	4	8	80	Baixo	C
	2	1	1	1	1,25	4	4	20	Muito Baixo	
VE06.2	4	1	6	10	5,25	2	2	21	Muito Baixo	A
	1	1	6	2	2,5	4	6	60	Baixo	

3) Determinado as estratégias dos planos de manutenção com base na classificação de criticidade e risco obtidos na etapa anterior, conforme a Tabela 9.

Tabela 9: Etapa 3 do Formulário FMEA

INSTRUMENTO	RPN	GRAU DE RISCO	CRITICIDADE INSTRUMENTO	ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO INSTRUMENTO
FT04	20	Muito Baixo	D	CORRETIVA NÃO PLANEJADA
	2,5	Muito Baixo		
	10	Muito Baixo		
	7,5	Muito Baixo		
LSH02	216	Medio	A	PREVENTIVA
	108	Medio		
	60	Baixo		
	15	Muito Baixo		
LT02	52,5	Baixo	C	CORRETIVA PLANEJADA
	20	Muito Baixo		
	4	Muito Baixo		
	2	Muito Baixo		
PSLL34	126	Medio	A	PREVENTIVA
	10	Muito Baixo		
	8	Muito Baixo		
	48	Muito Baixo		
TT16	40	Muito Baixo	B	PREVENTIVA
	60	Baixo		
	48	Muito Baixo		
	64	Baixo		
SCRO4	57,5	Baixo	A	PREVENTIVA
	108	Medio		
	16	Muito Baixo		
	45	Muito Baixo		
ESV01	90	Baixo	A	PREVENTIVA
	120	Medio		
	288	Medio		
	10	Muito Baixo		
SE02.1A	80	Baixo	C	CORRETIVA PLANEJADA
	20	Muito Baixo		
VE06.2	20	Muito Baixo	A	PREDITIVA
	21	Muito Baixo		
ZE04.2	60	Baixo	A	PREDITIVA
	21	Muito Baixo		
	15	Muito Baixo		

4) Revisado os planos de manutenção e analisado os resultados obtidos de forma quantitativa e qualitativa (gráficos e indicadores), permitindo uma estimativa financeira do retorno que o mesmo pode gerar para a empresa.

4.2 Análise dos resultados

O plano de manutenção atual aplicado nos turbogeradores da empresa prevê uma parada programada a cada três anos do equipamento, onde componentes e ativos mais importantes da máquina são desmontados e os componentes internos inspecionados e substituídos, se necessários, incluindo os instrumentos de controle e automação, onde todos os instrumentos são removidos e os considerados mais importantes sofrem uma calibração preventiva (40%), e aos demais se aplica uma manutenção corretiva planejada.

A Tabela 10 a seguir apresenta os custos com manutenção de equipamentos em geral e de manutenção em instrumentos dos sistemas de controle e automação, nos últimos sete anos com o turbogerador (TG02).

Tabela 10: Tabela de Custos de Manutenção em Turbogenerador (TG02)

Ano	Custo com Manutenção - Geral (M R\$)	Custo com Manutenção Planejada/Preventiva - Controle e Instrumentação (M R\$)	Custo com Manutenção Corretiva - Controle e Instrumentação (M R\$)	Total Custo com Manutenção - Controle e Instrumentação (M R\$)	Manut. Geral x Contr. e Instrum. (%)
2006	283,6	47,1	54,7	101,8	35,9%
2007 *	917,4	135,7	39,8	175,5	19,1%
2008	225,1	28,7	44,5	73,2	32,5%
2009	328,7	56,6	63,2	119,8	36,4%
2010 *	1735,8	384,6	31,3	415,9	24,0%
2011	185,9	30,3	35,8	66,1	35,6%
2012	279,3	47,2	56,3	103,5	37,1%

* - Parada de Manutenção Planejada

Fonte: (Sistema de gestão empresarial da empresa – SAP)

Pode-se constatar que anualmente os gastos com manutenção em controle e instrumentação são relativamente altos, onde se desconsiderando períodos de parada planejada, representa algo em torno de 35% do custo total de manutenção, e destes, mais de 50% são custos com manutenções corretivas, não previstas. Isto se deve muitas vezes a estratégias de manutenção mal planejadas, onde se acaba tendo muitas manutenções corretivas e preventivas desnecessárias. Além é claro, das implicações econômicas por perdas no processo de produção, devido a paradas desnecessárias do equipamento, ocasionadas por falhas funcionais destes instrumentos. Isto mostra que a ênfase atual da manutenção é direcionada apenas a preservação dos itens físicos.

Com a aplicação da ferramenta FMEA vista na seção anterior, foi possível identificar os modos de falhas dos principais instrumentos, seus graus de risco e criticidade, e a partir deles definir as melhores técnicas de manutenção. Os resultados obtidos da metodologia são representados em três gráficos, o primeiro apresentado na Figura 3 (a) mostra o grau de risco dos modos de falha, onde a maioria dos instrumentos (88%) possui um grau de risco moderado, apresentando valores com escala entre médio e baixo, porém com alto potencial de impacto á integridade e funcionamento do turbogerador, pois 89% são críticos “A”, “B” ou “C”, conforme pode visto na Figura 3 (b) que apresenta o nível de criticidade dos instrumentos.

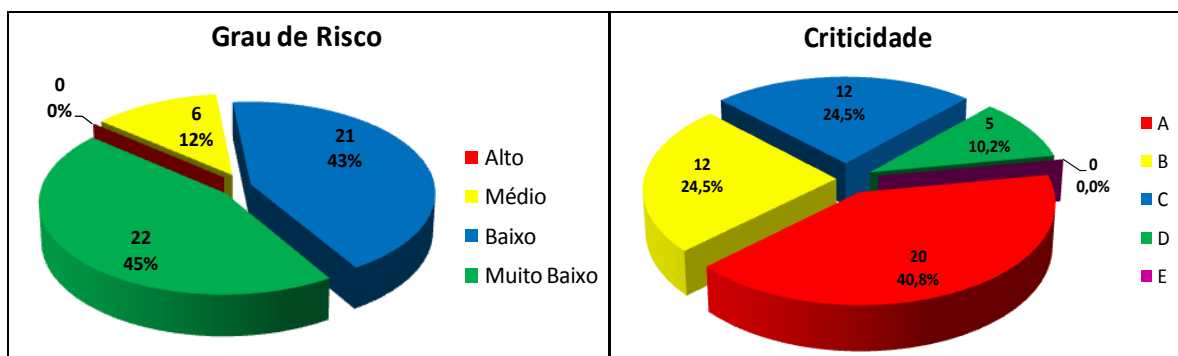


Figura 3: Gráfico de Grau de Risco (a) e Criticidade (b)

A partir do gráfico da Figura 4 que apresenta as estratégias de manutenção, e com base nas frequências de falha obtidas pela FMEA, se pode ver que é plenamente possível otimizar os planos de manutenção e reduzir os custos gastos hoje em manutenção no sistema de controle e instrumentação do turbogerador. Pois 32% dos ativos passarão a ter manutenção preditiva, baseado em condição, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível, já para outros 57% poderão ser aplicadas técnicas de manutenção preventiva e corretiva planejada, realizadas em intervalos a partir de 4 anos, ao invés dos 3 anos atuais.

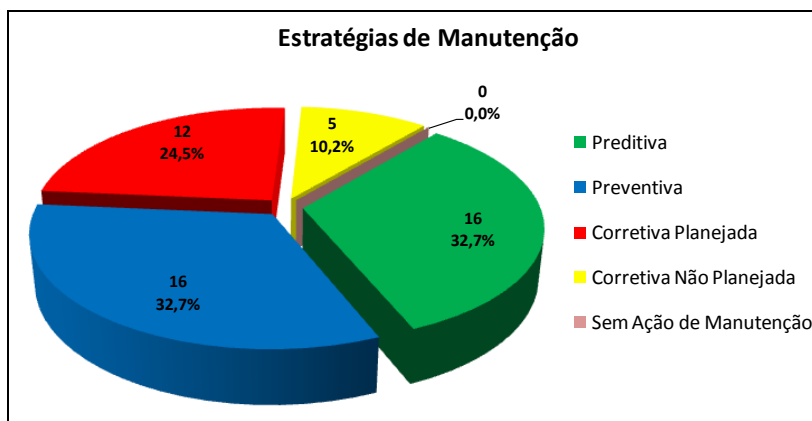


Figura 4: Gráfico das Estratégias de Manutenção

Logo se percebe uma redução de até 50% dos custos com manutenções preventivas e corretivas, devido á redução sistemática dos tempos de parada e carga horária de trabalho, em função da inspeção dos instrumentos e ao aumento dos intervalos de manutenção. Além dos ganhos econômicos obtidos através da redução dos gastos com aquisição de peças e maior aproveitamento da vida útil dos componentes. Além disto, a ferramenta também apontou a necessidade de substituição de três instrumentos (LSH02, LT02 e PT50) devido as recorrências de falhas, e de um estudo de melhoria para uma válvula de controle (LV02B) que apresenta seguidamente

problemas de trancamento e oscilação, que visam aumentar a confiabilidade do sistema de controle e instrumentação do turbogerador.

5. Conclusões

A aplicação da ferramenta FMEA em um sistema de controle e instrumentação de turbogerador mostrou que é possível se otimizar os planos de manutenção tradicionais, através da utilização de técnicas de manutenção adequadas, eficientes em performance e em custos, com base na análise e classificação do grau de risco e criticidade dos instrumentos, visando a minimização dos riscos e impactos das falhas sobre o sistema.

As generalidades do sistema e soluções propostas permitem sua aplicação a praticamente qualquer tipo de equipamento industrial. Sua implantação no turbogerador será realizada e acompanhada a partir da parada de manutenção do equipamento que ocorrerá em Abril de 2013, com apoio de uma equipe de engenheiros de manutenção, que irão analisar os resultados descritos como suporte do processo decisório.

Como andamento da análise, deve-se monitorar a conclusão de todas as ações de melhoria propostas e avaliar o sucesso das ações implementadas, através do contínuo acompanhamento das perdas ocasionadas pelas falhas dos instrumentos do sistema de controle e automação do equipamento. Para o futuro, pode-se também estender a análise realizada ao outro turbogerador (TG01) da empresa, visando validar e aprimorar os resultados obtidos pela metodologia FMEA.

Referências Bibliográficas

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). Hazardous release protection. New York, NY: ASME, 2000.
- ARABIAN-HOSEYNABADI H.; ORAEE H.; TAVNER P. J. Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2010 - v. 32(7). p. 817-824.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade*. Rio de Janeiro, 1994.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; GABBRIELLI, R. Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. *Quality and Reliability Engineering International*, 2000. v. 16, p. 313–324.
- COELHO, L. K.; SILVA, G. A.; FILHO, O. P. A.; BORBA, J. L. *Aplicação da manutenção centrada em confiabilidade à extrusora polimérica*. XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial. Porto Alegre - RS, 2011.
- DHILLON, B. S. *Maintainability, maintenance and reliability for Engineers*. 1ª. ed. New York: CRC Press, 2006.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. 1 ed. Porto Alegre: Elsevier, 2009.
- GUIMARÃES, A.C.F.; LAPA, C.M.F. Fuzzy FMEA applied to PWR chemical and volume control system. *Progress in Nuclear Energy*, 2004 - v.44 (3). p. 191–213.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. *Manutenção: função estratégica*. 4ª. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- KHAN, F. I.; HADDARA, M. M. Risk-based maintenance (RBM): a new approach for process plant inspection and maintenance. *Process Safety Progress*, 2004b - v. 23(4). p. 252-265.
- KHAN, F. I.; HADDARA, M. M. Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities. *Journal of Hazardous Materials*, 2004a - v. 108(3). p. 147-159.
- KHAN, F. I.; HADDARA, M. R. Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities. *Journal of Hazardous Materials*, 2004. v.108. p. 147–159.
- LINO, H. S. *Aplicação do fmea em sistema de acionamento de turbinas a vapor de uma usina de açúcar e bioenergia*. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Carlos - SP, 2010.
- LOPES, N. *Apostila de equipamentos rotativos*. Triunfo - RS, 2001. 168p.
- MOUBRAY, J. *Reliability-Centered Maintenance (RCM): Manutenção Centrada em Confiabilidade*. 2ª. ed. Lutterworth, Inglaterra: Aladon, 2000.

NORD, L. O.; ANANTHARAMAN, R.; RAUSAND, M.; BOLLAND, O. A qualitative reliability and operability analysis of an integrated reforming combined cycle plant with CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009 - v. 3 (4). p. 411-421.

PICKARD K.; MÜLLER P.; BERTSCHE B. Multiple failure mode and effects analysis: an approach to risk assessment of multiple failures with FMEA. *In: Reliab maint symp annual. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*, 2005. p. 457–62.

SILVA, R. L. A.; SOARES, P. R. F. T.; SILVA, A. K. B. *Análise de risco utilizando a ferramenta FMEA em um gerador de vapor*. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro - RJ, 2008.

SMITH R.; R. KEITH R. K. - *Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.

XIAO N.; HUANG H-Z.; LI Y.; HE L.; JIN T. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. *Engineering Failure Analysis*, 2011 - v. 18(4). p. 1162-1170.

XU K.; TANG L. C.; XIE M.; HO S. L.; ZHU M. L. - Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 2002 - v.75. p. 17–29.