

## APLICAÇÃO DE FMECA PARA DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO EM UM SISTEMA DE CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DE TURBOGERADORES

Cristiano Herpich<sup>1</sup>

Flávio Sanson Fogliatto<sup>2</sup>

**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, 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*). Foram identificados e classificados os equipamentos críticos de um sistema de controle e instrumentação de um turbogerador. Apresentando o grau de risco dos modos de falha, em termos de segurança, meio ambiente, perdas de produção e custos de manutenção. E de acordo com sua importância define-se a melhor estratégia de manutenção. A aplicação do método permitiu otimizar os planos de manutenção, reduzindo os custos com manutenção corretiva e preventiva, aumentando a confiabilidade do equipamento.

**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

---

<sup>1</sup> Graduando pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia de Produção – PPGEP, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS/Brasil. E-mail: [cherpich@gmail.com](mailto:cherpich@gmail.com).

<sup>2</sup> Ph.D. em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS/Brasil. E-mail: [ffogliatto@gmail.com](mailto:ffogliatto@gmail.com).

produtividade, visto que garantem uma maior disponibilidade dos equipamentos a um menor custo de manutenção. Segundo Moubray (2000), no velho paradigma da manutenção, o objetivo era otimizar a disponibilidade da planta ao mínimo custo. No novo paradigma, a 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 mantêm 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 planejada ou não 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.

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, que buscam a previsão ou antecipação da falha, medindo parâmetros que indiquem a evolução de uma falha a tempo de serem corrigidas.

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 foi aplicada a metodologia proposta possui um sistema composto por dois turbogeradores, a vapor e um turbogerador a gás/óleo, que aproveitam o vapor superaquecido e o óleo combustível provenientes do seu processo industrial, e a relação custo-benefício do gás natural, para produzir energia elétrica por meio 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 difícil definir a estratégia de manutenção ideal para cada instrumento, conforme o seu grau de risco, custo e importância no processo industrial.

O objetivo deste trabalho é apresentar a aplicação da ferramenta FMECA 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, assim, o tipo de manutenção e o mecanismo 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. Além desta introdução, o artigo apresenta: (ii) o referencial teórico; (iii) procedimentos metodológicos; (iv) os resultados; (v) as considerações finais; e, por fim, (vi) as referências utilizadas.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesta seção serão abordados os fundamentos do método e ferramenta de RCM utilizado.

### **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; 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).

Independente dos métodos e das ferramentas de RCM utilizadas, o importante é determinar um bom plano de manutenção, de modo a garantir a confiabilidade e a segurança operacional dos equipamentos e instalações, ao menor custo.

#### **2.1.2 Análise de Modos e Efeitos de Falhas**

Mais conhecida pela sigla em inglês FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), a análise de modos e efeitos de falha 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 por meio de técnicas de manutenção (SMITH; KEITH, 2008). De acordo com os autores, as falhas encontradas por meio da técnica FMEA são priorizadas a partir da criticidade das causas, utilizando o índice RPN (Grau de Prioridade de Risco), composto pelo produto dos seguintes indicadores: 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), ocorrência (frequência com que o modo de falha ocorre) e 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 – *Criticality Analysis*). 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; 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 FMEA são amplos na área de MCC, e a literatura apresenta várias pesquisas e aplicações relacionadas ao uso da ferramenta. Alguns desses estudos destacadas a seguir. Cho et al. (2002) apresentam o método baseado em lógica *Fuzzy* para uma melhor aplicação da FMEA, utilizando um sistema de turbogerador a diesel para ilustrar a viabilidade do método proposto. Os resultados ajudaram a estabelecer relações que são úteis para a confiabilidade das turbinas eólicas.

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, custos de manutenção,

frequência de falhas, tempo de inatividade devido às falhas e condições de operação), multiplicada por um sétimo fator (dificuldade de acesso da máquina), em que a importância relativa dos seis atributos foi estimada utilizando comparações em pares.

Guimarães e Lapa (2004) aplicaram a FMEA em um Sistema de Controle Químico e Volumétrico (CVCS – *Chemical and Volumetric Control System*) usado em usinas nucleares, para priorizar os parâmetros de risco do sistema e o compararam a um sistema lógico de inferência *Fuzzy*, com a utilização dos escores das opiniões de especialistas. Silva et al. (2008) que revelam a importância da gestão de equipamentos utilizando a FMEA para revisar o programa de manutenção de equipamentos críticos de um gerador de vapor (caldeira flamotubular). Os resultados da análise ofereceram 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.

Nord et al. (2009) tratam de uma análise de confiabilidade qualitativa por meio 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. Já Arabian-Hoseynabadi et al. (2010) aplicaram a 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.

Lino (2010) constatou que após as implantações de ações previamente planejadas e extraídas de uma FMEA em turbinas a vapor de uma usina de açúcar e bioenergia. Obteve-se diversos ganhos, tais 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; falhas na lubrificação de acoplamentos, entre outros.

Coelho et al. (2011) aplicaram a FMEA em uma extrusora polimérica, prevendo a análise de falhas e a aplicação das demais técnicas da MCC. Por meio 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.

Xiao et al. (2011) estudaram a aplicação de FMEA para o caso de múltiplos modos de análise de falhas, concentrando-se no cálculo do RPN. O estudo estendeu o 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.

### 3 MÉTODO

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.

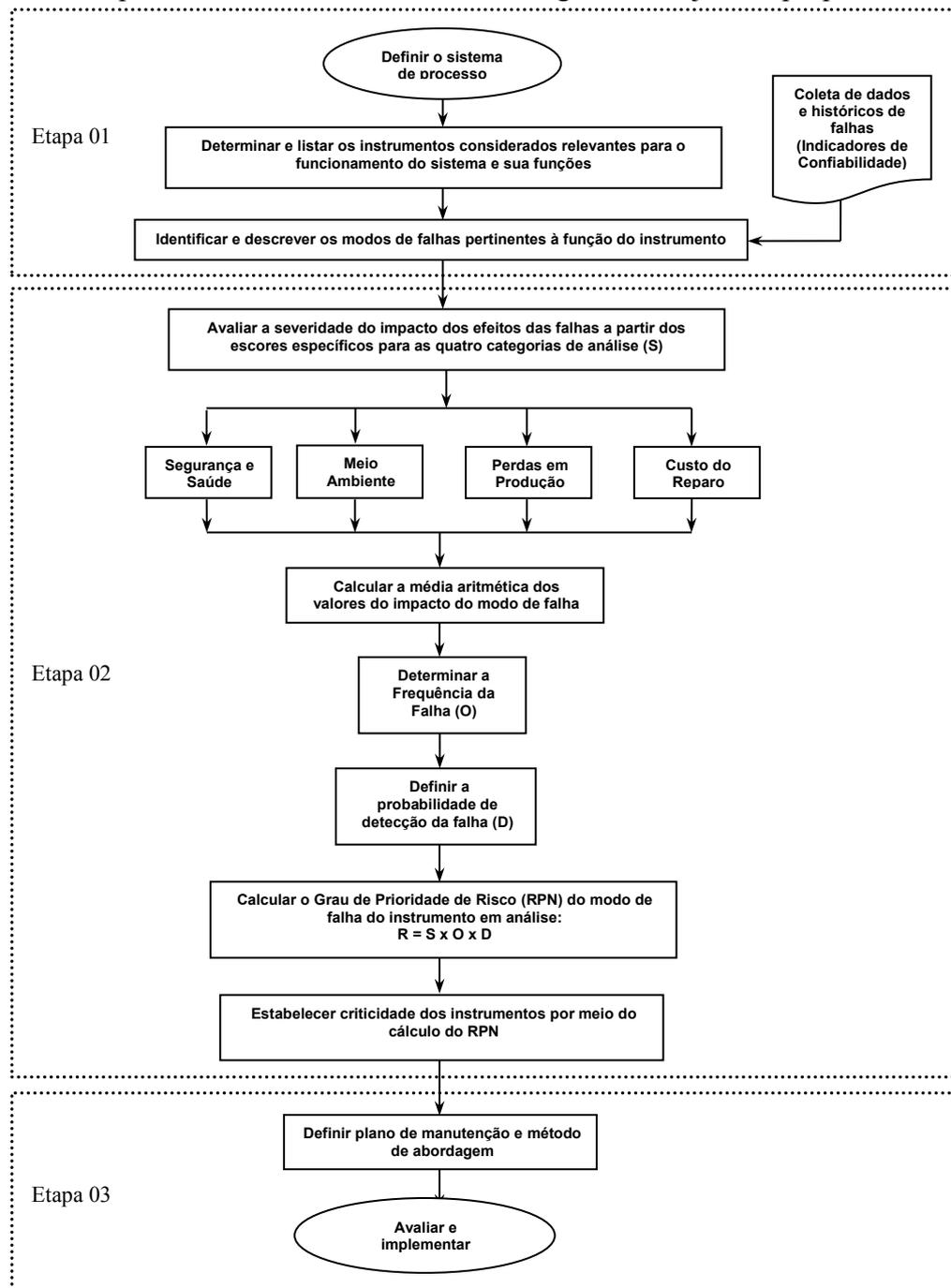


Figura 1 – Fluxograma da metodologia aplicada no desenvolvimento da ferramenta  
 Fonte: Adaptado de Smith e Keith (2008)

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 por meio de históricos de manutenção.

### **3.1 Descrição das Etapas e Ações Propostas**

As etapas que compõem a metodologia aplicada e suas ações propostas são baseadas em critérios e matrizes, que podem ser obtidas por meio de referências bibliográficas e normas técnicas 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.

#### **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. Também são identificadas suas funções e seus modos de falhas dominantes, conforme base de dados e históricos de manutenção do sistema.

#### **Etapa 2: Classificação da faixa de risco e criticidade dos instrumentos por meio 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 no Quadro 1, 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 pelo cálculo da média aritmética dos valores.

| Efeito          | Catastrófico<br>10                                      | Crítico<br>8  | Alto<br>6                                       | Moderado<br>4  | Baixo<br>2   | Sem Impacto<br>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      |

Quadro 1 – Matriz de Efeito × Impacto  
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 1.

Tabela 1 – 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      | $2 \text{ Anos} < O \leq 4 \text{ Anos}$ |
| 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, por meio da escala apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – 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)

Com os valores atribuídos de Severidade, Ocorrência e Detecção dos modos de falha, calcula-se o seu grau de prioridade de risco como o produto entre frequência de ocorrência de um evento (O), impacto ou magnitude das consequências 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 3.

Tabela 3 – Categorias de modo de falha

| RISCO | RPN             |                  |                 |                     |
|-------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------|
|       | Alto<br>20-1000 | Médio<br>101-500 | Baixo<br>51-100 | Muito Baixo<br>0-50 |

Fonte: Adaptado de Smith e Keith (2008)

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 consequências decorrentes de sua eventual falha. A matriz de criticidade da Tabela 4 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 4 – Matriz de Classificação de Criticidade

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

Fonte: Adaptado de Smith e Keith (2008)

### Etapa 3: Definição das técnicas de manutenção e dos métodos de abordagem

Com base na classificação de criticidade, são estabelecidas abordagens e ações para cada uma das dimensões associadas à estratégia de manutenção, conforme apresentado no Quadro 2, que servirá de base para determinar o tipo de manutenção adequado a cada instrumento.

Quadro 2 – Matriz de Estratégias de Manutenção

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

Fonte: Adaptado de Smith e Keith (2008)

Após o término da análise e aplicação das ações, um processo de auditoria faz-se necessário para verificar a eficácia da aplicação e do método, por meio da análise dos seus

resultados e dos dados da análise. Possíveis erros e desvios durante o processo de implantação ou após a conclusão da análise podem realimentar o FMECA, criando um ciclo contínuo de melhoria do processo analisado e da ferramenta FMECA.

#### 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 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 mostra os cinco blocos de diagramas de processo do turbogerador, 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  $120\text{kgf/cm}^2$  na câmara de alta pressão, por meio 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.

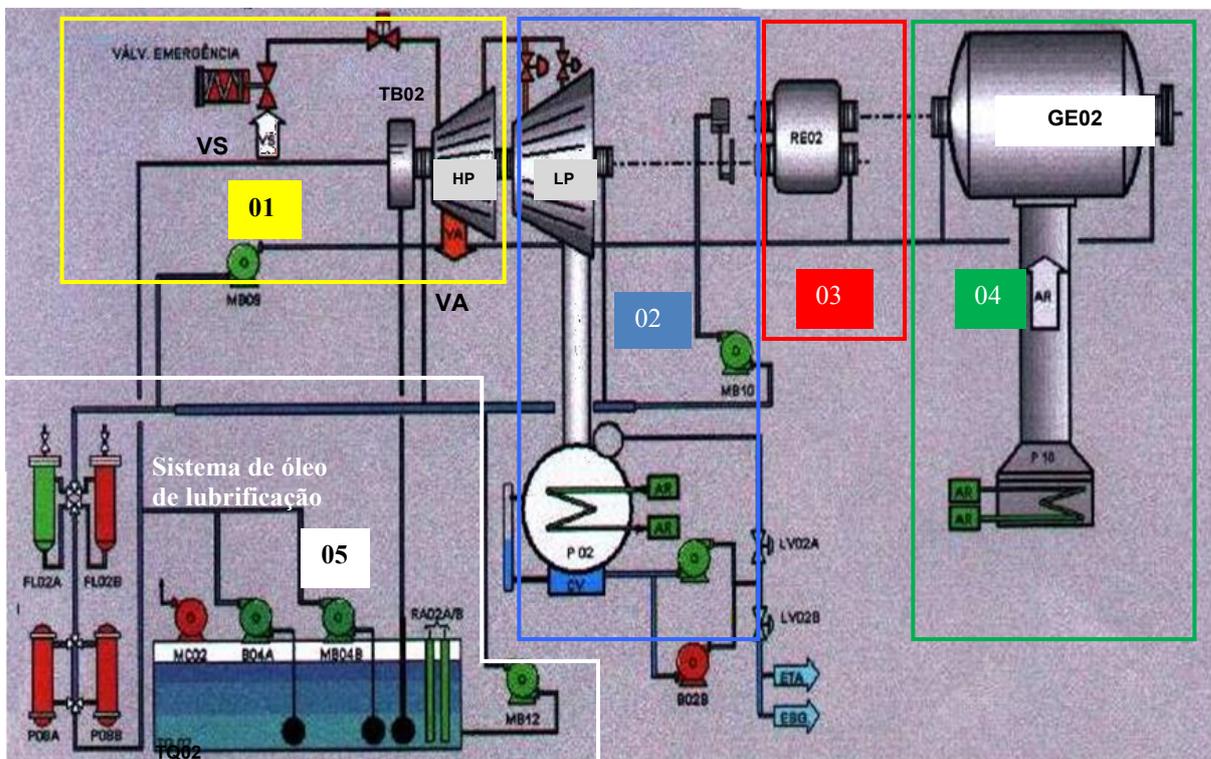


Figura 2 – Diagrama de um turbogerador à vapor e seus periféricos  
Fonte: Lopes (2001)

No bloco 02 tem-se o segundo estágio, que admite parte do VA extraído do primeiro estágio por meio 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) por meio 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 por meio 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 por meio de sensores 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 por meio 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.

No trabalho serão considerados os principais instrumentos de cada subsistema, com foco nos que possuem maior grau de impacto á operação do turbogerador, baseados nas funções desempenhadas.

#### 4.1. Desenvolvimento e aplicação da ferramenta

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

- 1) Foram 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 o mostrado no Quadro 3.

| 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                    |   |   |
|                           | LSH02  | Chave de Nível Alto do Condensador de Superfície                | Vazamento                               | Quebra das palhetas da turbina                    |   |
|                           |  |   | Descalibração                           |   |   |
|                           | LT02   | Medição de Nível de Condensado                                  | Desgaste mecânico                       | Desarme indevido do turbogerador                  |   |
|                           |  |   | Falha da chave                          |   |   |
| ÓLEO DE LUBRIFICAÇÃO      | PSLL34   | Chave de Pressão Extra Baixa do Óleo de Lubrificação da Turbina | Descalibração                           | Excesso de condensação de vapor                   |   |
|                           |  |   | Obstrução                               |   |   |
|                           | TT16   | Medição de Temperatura do Óleo de Lubrificação                  | Descalibração                           | Descontrole de nível de condensado                |   |
|                           |  |   | Vazamento                               |   |   |
|                           | PROTEÇÃO DIGITAL DO GERADOR                            | SCR04   | Relé de Sobrecarga de Tensão/Corrente   | Falha do transmissor                              | Falta de lubrificação mecânica da turbina |
|                           |  |   |   | Curto circuito                                    |   |
| Falha da chave            |  |   |   |   |   |
| Descalibração             |  |   |   |   |   |
| VELOCIDADE                | ESV01  | Válvula Shut-Down de Parada de Emergência da Turbina            | Falha do transmissor                    | Desarme indevido do turbogerador                  |   |
|                           |  |   | Falha do sensor                         |   |   |
|                           | SE02.1A  | Sensor de Velocidade da Turbina                                 | Falha do sensor                         | Desarme indevido do turbogerador                  |   |
|                           |  |   | Mau contato                             |   |   |
|                           | VE06.2   | Sensor de Vibração do Lado Oposto ao Acoplamento da Turbina     | Falha do sensor                         | Danos mecânicos na turbina por vibração           |   |
|                           |  |   | Mau contato                             |   |   |
| VE12.1                    | Sensor de Vibração do Lado Acoplado do Redutor-Gerador | Falha do sensor   | Desarme indevido do turbogerador        |   |   |
|                           |  | Mau contato   |   |   |   |
| ZE04.2                    | Sensor de Deslocamento Axial do Redutor                | Falha no sensor   | Danos mecânicos no redutor por vibração |   |   |
|                           |  | Mau contato   |   |   |   |
| DESMONTE                  | ZE04.2   | Sensor de Deslocamento Axial do Redutor                         | Falha no sensor                         | Danos mecânicos no redutor por deslocamento axial |   |
|                           |  |   | Mau contato                             |   |   |

Quadro 3 – Etapa 1 do Formulário FMEA  
 Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009)

2) Foram 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. Foi aplicada a ferramenta FMEA, avaliando e determinando os impactos dos modos de falha, suas frequências e suas probabilidades de ocorrência. Foram calculados 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 consolidado no Quadro 4.

| 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   |                         |
|             | 1                 | 1             | 6        | 2               | 2,5                       | 4                       | 9                     | 90   | Baixo         |                         |
| ESV01       | 8                 | 4             | 8        | 10              | 7,5                       | 2                       | 8                     | 120  | Medio         | A                       |
|             | 8                 | 6             | 8        | 10              | 8                         | 4                       | 9                     | 288  | Medio         |                         |
|             | 1                 | 1             | 6        | 2               | 2,5                       | 1                       | 4                     | 10   | Muito Baixo   |                         |
|             | 1                 | 1             | 6        | 2               | 2,5                       | 4                       | 8                     | 80   | Baixo         |                         |
| SE02.1A     | 2                 | 1             | 1        | 1               | 1,25                      | 4                       | 4                     | 20   | Muito Baixo   | C                       |
|             | 1                 | 1             | 6        | 2               | 2,5                       | 2                       | 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         |                         |

Quadro 4 – Etapa 2 do Formulário FMEA  
 Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009)

3) Foram determinadas as estratégias dos planos de manutenção com base na classificação de criticidade e risco obtidas na etapa anterior, conforme consolidado na Quadro 5.

| 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         |                         |                                      |
| SCR04       | 57,5 | Baixo         | A                       | PREVENTIVA                           |
|             | 108  | Medio         |                         |                                      |
|             | 16   | Muito Baixo   |                         |                                      |
|             | 45   | Muito Baixo   |                         |                                      |
|             | 90   | Baixo         |                         |                                      |
| ESV01       | 120  | Medio         | A                       | PREVENTIVA                           |
|             | 288  | Medio         |                         |                                      |
|             | 10   | Muito Baixo   |                         |                                      |
|             | 80   | Baixo         |                         |                                      |
| SE02.1A     | 20   | Muito Baixo   | C                       | CORRETIVA PLANEJADA                  |
|             | 20   | Muito Baixo   |                         |                                      |
| VE06.2      | 21   | Muito Baixo   | A                       | PREDITIVA                            |
|             | 60   | Baixo         |                         |                                      |
| ZE04.2      | 21   | Muito Baixo   | A                       | PREDITIVA                            |
|             | 15   | Muito Baixo   |                         |                                      |

Quadro 5 – Etapa 3 do Formulário FMEA  
Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009)

- 4) Foram revisados os planos de manutenção e analisados os resultados obtidos de forma quantitativa e qualitativa (gráficos e indicadores), permitindo uma estimativa financeira do retorno que os mesmos podem 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, na qual componentes e ativos mais importantes da máquina são desmontados e os componentes internos inspecionados e substituídos, se necessário. Também são incluídos os instrumentos de controle e automação, tal que todos os instrumentos são removidos e aqueles considerados mais importantes sofrem uma calibração preventiva (40%). Aos demais se aplica uma manutenção corretiva planejada.

A Tabela 5 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 5 – 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. Desconsiderando períodos de parada planejada, representam 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, que resultam em manutenções corretivas e preventivas desnecessárias. Somem-se a isto as implicações econômicas por perdas no processo de produção, devido a paradas desnecessárias do equipamento, ocasionadas por falhas funcionais. Isto mostra que a ênfase atual da manutenção é direcionada apenas à preservação dos itens físicos.

Com a aplicação da ferramenta FMEA, 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 3a, 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 à integridade e funcionamento do turbogenerador, pois 89% são críticos “A”, “B” ou “C”, conforme pode visto na Figura 3b que apresenta o nível de criticidade dos instrumentos.

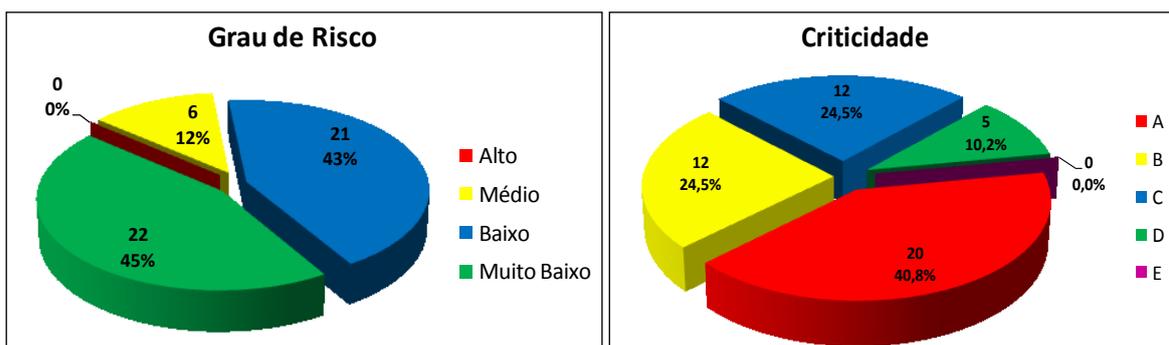


Figura 3 – Resultados obtidos de Grau de Risco (a) e Criticidade (b) a partir da ferramenta FMEA

A partir da Figura 4, que apresenta as estratégias de manutenção, e com base nas frequências de falha obtidas pela FMEA, se pode ver que é possível otimizar os planos de manutenção e reduzir os custos gastos hoje em manutenção no sistema de controle e instrumentação do turbogerador. Assim, 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.

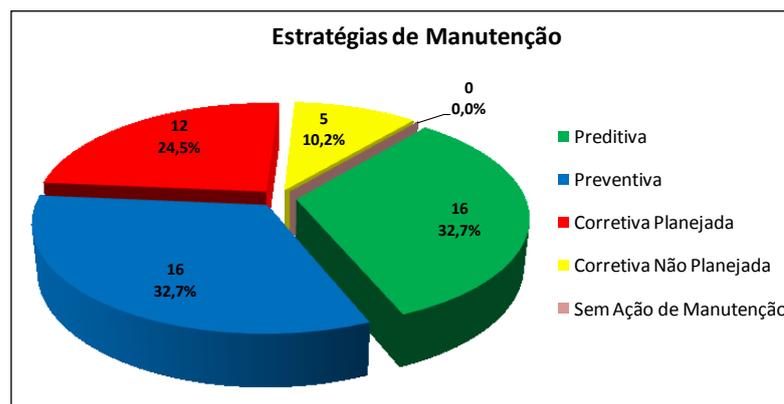


Figura 4 – Definição das Estratégias de Manutenção por meio do resultado da ferramenta FMEA

Logo, se percebe uma redução de até 50% dos custos com manutenções preventivas e corretivas, devido à redução sistemática dos tempos de parada e carga horária de trabalho, em função da inspeção dos instrumentos e ao aumento dos intervalos de manutenção. Somam-se a isto os ganhos econômicos obtidos por meio 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 às recorrências de falhas, e de um estudo de melhoria para uma válvula de controle (LV02B) que apresenta seguidamente problemas de travamento e oscilação.

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação da ferramenta FMEA em um sistema de controle e instrumentação de turbogerador mostrou que é possível otimizar os planos de manutenção tradicionais, por meio da utilização de técnicas de manutenção adequadas, eficientes em desempenho 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 desdobramento futuro da análise, deve-se monitorar a conclusão de todas as ações de melhoria propostas e avaliar o sucesso das ações implementadas, por meio 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.

## **APPLICATION OF FMECA FOR DEFINITION OF MAINTENANCE STRATEGIES IN A SYSTEM OF CONTROL AND INSTRUMENTATION OF TURBOGENERATORS**

**ABSTRACT:** The use of advanced techniques in maintenance management has provided increasingly reliability and safety at industrial production systems, resulting in a greater availability of equipment's with a lower cost of maintenance. The Reliability Centered Maintenance (RCM) is a method used for maintenance planning, initially developed in the aircraft industry and later adapted to many other industries and military institutions. This article presents the study and development of a method risk analysis based on the model of Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA). There were identified and classified the critical equipment's of a control and instrumentation system of a turbogenerator. Presenting the degree of risk of failure modes in terms of safety, environment, loss of production and maintenance costs. According to their importance, the best maintenance strategy is defined. The application of the method has permitted the optimization of the maintenance plans, reducing the costs with preventive and corrective maintenance, increasing the equipment reliability.

**Keywords:** Maintenance. RCM. FMECA. Maintenance Strategy.

### **REFERÊNCIAS**

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*, v. 32, n. 7. p. 817-824, 2010.

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**, v. 16, p. 313-324, 2000.

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, **Anais...**, Porto Alegre - RS, 2011.

DHILLON, B.S. **Maintainability, maintenance and reliability for Engineers**. 1. 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**, v. 44, n. 3. p. 191-213, 2004.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KHAN, F.I.; HADDARA, M.R. Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities. **Journal of Hazardous Materials**, v. 108, p. 147-159, 2004.

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, **Anais...**, São Paulo, 2010.

LOPES, N. **Apostila de equipamentos rotativos**. Triunfo - RS, 2001. 168p.

MOUBRAY, J. **Reliability-Centered Maintenance (RCM): Manutenção Centrada em Confiabilidade**. 2. 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**, v. 3, n. 4, p. 411-421, 2009.

PICKARD K.; MÜLLER P.; BERTSCHE B. Multiple failure mode and effects analysis: an approach to risk assessment of multiple failures with FMEA. **Proceeding...**, Reliab main 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, **Anais...**, 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**, v. 18, n. 4. p. 1162-1170, 2011.

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**, v. 75, p. 17-29, 2002.

Originals recebidos em: 26/06/2013

Aceito para publicação em: 10/09/2013