

## **Aplicação do método FMEA nos geradores de vapor de uma usina do Setor Sucroenergético para o mapeamento e análise de riscos de falhas.**

William Douglas Paes Coelho (FHO - UNIARARAS) [william@uniararas.br](mailto:william@uniararas.br)  
Ivana Salvagni Rotta (FHO - UNIARARAS) [ivanasr@uniararas.br](mailto:ivanasr@uniararas.br)

### **Resumo:**

As usinas sucroalcooleiras desempenham um papel muito importante para a economia brasileira em relação à produção de açúcar e álcool, e, através da exportação desses produtos. Dessa produção é gerado o bagaço que, através de sua queima, gera o vapor que é produzido nas caldeiras. Por isso, este artigo apresenta os resultados de um estudo de caso que teve a finalidade de mapear e analisar os riscos de falhas que podem ocorrer no setor das caldeiras que produz o vapor necessário para gerar energia para toda a usina. Para isso, foi utilizada a ferramenta FMEA para identificar os modos de falhas e os seus efeitos, conseguindo assim, verificar os riscos de falhas mais relevantes analisando-as para prevenir a ocorrência dessas, e propor melhorias para o controle dessas falhas através de medidas de contingências (manutenção corretiva) e de controle (manutenção preventiva e preditiva).

**Palavras chave:** Método FMEA, Geradores de Vapor, Riscos de Falhas.

## **Applying the method FMEA in steam generators in a power plant Sugarcane Industry for flaming and analysis of risks of failures**

### **Abstract**

The sugar and alcohol plants play an important role for the Brazilian economy over the production of sugar and alcohol, and by exporting these products. This production is that the bagasse generated through burning, generates steam that is produced in the boilers. Therefore, this article presents the results of a case study that aimed to map and analyze the risks of failure that may occur in the boiler industry that produces the steam needed to power the entire plant. For this, the tool was used FMEA to identify failure modes and their effects, thus, determine the risks of failure by analyzing the most important to prevent the occurrence of these, and propose improvements to the control of these faults through measures contingency (corrective maintenance) and control (preventive and predictive maintenance).

**Key-words:** FMEA Method, Steam Generators, Risk of Failure.

### **1. Introdução**

Atualmente, o setor sucroenergético é de grande importância para a economia brasileira, de acordo com Mente (2010) o Brasil é o maior produtor mundial de açúcar e o segundo maior exportador de etanol, sendo a cana-de-açúcar o principal insumo no setor. Segundo dados obtidos da Conab (2010) e da ÚNICA (2011), a produção da safra 2010/11 atingiu o volume

recorde de aproximadamente 650 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, processadas em mais de 400 usinas, com faturamento anual bruto do setor de US\$ 23 bilhões.

Para a produção de açúcar e álcool, através da cana-de-açúcar processada, é gerada uma grande quantidade de bagaço nas usinas. Antigamente, esse bagaço era considerado como resíduo industrial, porém, hoje é utilizado como produtor de energia térmica e elétrica em sistemas de cogeração existentes na maioria das usinas sucroalcooleiras do país e, segundo Oliveira (2007), fazendo com que a cana-de-açúcar seja utilizada quase que integralmente, elevando a busca por opções diferenciadas para o seu completo aproveitamento.

Para queimar o bagaço e produzir o vapor, são utilizados os geradores de vapor, mais conhecidos como caldeiras. As usinas do setor sucoenergético utilizam caldeiras do tipo aquatubulares, onde o vapor produzido é direcionado para ativar os turbo geradores (gerando energia elétrica), as turbo moendas, as turbinas do sistema de preparo da cana, as turbo bombas e os turbo exaustores (DANTAS, 2010).

Esses geradores de vapor operam com pressões bem acima da pressão atmosférica. Dessa forma, por se tratar de um dispositivo com alta criticidade, tanto na possibilidade de falhas durante sua operação, podendo gerar perdas no processo produtivo, até mesmo na possibilidade de graves acidentes, com risco a vida, torna-se relevante o presente trabalho, uma vez que o mesmo pretende realizar o mapeamento das possíveis falhas, caracterização destas e definição de planos de ação tanto de prevenção quanto de correção.

Os riscos podem ser identificados e analisados através de ferramentas para o Gerenciamento de Riscos. Dentre as diversas técnicas existentes, a técnica de análise de risco utilizada é o FMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falhas), por ser tratar de um método utilizado nas empresas de todo o mundo. Através do FMEA, segundo Pardo (2009), é possível organizar e classificar os riscos, identificando a relevância de cada um e propor as melhores soluções para eliminar ou diminuir a probabilidade de uma falha potencial ocorrer.

Uma das maneiras para prevenção das falhas seria através das ações de manutenções realizadas nos equipamentos que torna mais longa a vida útil destes.

Assim, o principal objetivo deste estudo de caso é verificar as falhas que podem ocorrer nas caldeiras e analisá-las para prevenir a ocorrência destas, além de propor soluções de melhorias para controle das falhas através de medidas de contingência (manutenção corretiva) e controle (manutenção preventiva e preditiva).

## 2. Revisão da Literatura

A maioria das usinas do setor sucroalcooleiro são autossuficientes na produção de energia, pois utilizam a cogeração de energia a partir da queima do bagaço de cana, gerando o vapor que alimenta todos os processos da usina. Esse vapor é produzido pelas caldeiras que, de acordo com Leite e Militão (2008), são equipamentos responsáveis por transformar água em vapor sob pressões superiores à atmosférica, que ocorre através de uma troca térmica entre a água e a queima de um combustível.

Segundo Silva et al. (2008), as caldeiras podem ser classificadas quanto ao tipo em:

- Flamotubulares: onde a circulação dos gases de combustão é no interior dos tubos e a água vaporizada circula pelo lado de fora, essas caldeiras operam com pressões em torno de 10 kgf/cm<sup>2</sup> e, produzem no máximo 15 t/h de produção de vapor;
- Aquatubulares: cuja circulação dos gases de combustão é externa e os tubos conduzem massa de água e vapor, trabalham com pressões superiores a 40 kgf/cm<sup>2</sup> e chegam a produzir até 750 t/h, sendo este tipo de caldeira utilizada nas usinas sucroalcooleiras.

A eficiência dos processos da usina depende do vapor gerado, pois quando o vapor está com baixa pressão pode comprometer no rendimento da produção, ocasionando até paradas do processo. Sendo assim, é fundamental o controle do comportamento do vapor, deixando-o sempre estável, por isso, a caldeira é um equipamento que, além de possuir um elevado custo, possui uma grande responsabilidade, com isso, é importante que seja feito o gerenciamento dos riscos de falhas que podem ocorrer nelas. Segundo Bentes (2007), o gerenciamento de riscos relaciona-se com a identificação, análise, avaliação e tratamento dos riscos, minimizando a possibilidade e a probabilidade de ocorrência das falhas.

De acordo com Pardo (2009), análise de risco é a combinação de um processo qualitativo que fornece informações a respeito de eventos indesejados e de um processo quantitativo das probabilidades e consequências esperadas dos riscos identificados. Para Gonçalves (2006), essa análise tem como objetivo responder a questões como: o que pode dar errado, qual é a probabilidade de acontecer e quais são as consequências.

Para a análise dos riscos, um método bastante aplicado é o FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) que, conforme Zambrano e Martins (2007), consiste em identificar as prováveis falhas, estabelecer as prioridades para o tratamento dessas e implementar as ações recomendadas. No Gerenciamento de Risco, o FMEA pode ser usado como uma ferramenta com enfoque preventivo, auxiliando na identificação de problemas potenciais, suas causas e efeitos (LIMA et al., 2006).

Segundo Palady (1997), o FMEA oferece três funções distintas, como ferramenta para prognóstico de problemas, como procedimento para desenvolvimento e execução de projetos, processos ou serviços, novos ou revisados e, como diário de projeto, processo ou serviço.

O FMEA proporciona para a empresa melhor conhecimento e informações sobre as falhas dos produtos ou processos, diminuição de custos (prevenindo a ocorrência das falhas) e atitudes de prevenção das falhas (SANT' ANNA; JUNIOR, 2010).

De acordo com Leal (2006), as falhas encontradas através dos formulários do FMEA são priorizadas a partir da criticidade das causas, utilizando o RPN (Grau de Prioridade de Risco) que é composto pelo produto dos seguintes fatores: a ocorrência (frequência da falha), a severidade (gravidade do efeito da falha) e a detecção (facilidade para detectar a falha).

Após identificar os modos de falhas mais importantes, listam-se todas as ações que podem ser realizadas para diminuir os riscos. Dentre essas medidas pode-se ter: prevenção total ao tipo de falha ou a causa de falha, medidas que dificultam a ocorrência de falhas, que limitem o efeito do tipo de falha e que aumentam a probabilidade de detecção do tipo ou causa da falha (SANT' ANNA; JUNIOR, 2010).

Uma das soluções para melhoria no controle dos riscos de falhas é a manutenção. Souza (2008) define manutenção como sendo as ações que mantém ou restabelecem um equipamento ou sistema, garantindo a qualidade de seu serviço. A manutenção pode ser classificada em corretiva, preventiva e preditiva. Na manutenção corretiva é efetuado o conserto após a quebra de um equipamento, gerando vários inconvenientes e tendo como consequências, paradas imprevistas acarretando em grandes prejuízos em relação às perdas de produção e, o aumento dos custos de manutenção.

A manutenção preventiva é feita em períodos pré-determinados, reduzindo assim, a probabilidade de falhas ou degradação, prolongando a vida dos equipamentos (ALVES, 2009).

Para Zaions (2003), a manutenção preditiva garante a qualidade do equipamento, controlando as condições de funcionamento das máquinas em serviço através de instrumentos próprios de

medição, aplicando-se técnicas e análise, utilizando-se de meios de supervisão ou de amostragem e, realizando a manutenção somente quando houver necessidade.

O FMEA envolve diretamente as ações de manutenções corretivas, preventivas e preditivas para controle (prevenção) ou medidas de contingência (correção) dos modos de falhas. Uma vez que possibilita uma visão das causas prioritárias que levam aos efeitos de falhas mais críticos. Segundo Palady (1997), o modelo FMEA é uma ferramenta eficaz de análise de falhas, com baixos custos e facilidade de desenvolvimento, podendo ser utilizada em inúmeras aplicações onde se deseja reprimir a ocorrência de falhas.

### 3. Metodologia

O trabalho foi realizado a partir de um estudo de caso em uma usina de açúcar e álcool do interior do estado de SP, onde se escolheu o setor das caldeiras, por se tratar de um dos processos mais importante e crítico, com grandes chances de ocorrência de falhas que envolvem tanto a diminuição ou parada de produção, quanto o risco à vida. Para Yin (2005), o estudo de caso é uma pesquisa empírica que abrange o planejamento, a coleta de dados e a análise dos mesmos, onde, através dele, conseguem-se características específicas de um determinado contexto, combinando diferentes técnicas de coleta de dados.

A pesquisa desenvolvida é do tipo exploratória e qualitativa, na qual para analisar os riscos de falhas que podem vir a ocorrer, utilizou-se a ferramenta FMEA como método de avaliação. Segundo Silva e Menezes (2001), a pesquisa exploratória torna o problema mais explícito, construindo hipóteses, envolvendo também, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado e análise de exemplos que estimulem a compreensão. Os autores complementam que a pesquisa qualitativa, por sua vez, é descritiva, onde os pesquisadores tendem a analisar seus dados indutivamente.

Dessa forma, baseando-se em formulários estruturados, iniciou-se primeiramente o processo de coleta de dados através de uma análise histórica de dados disponibilizados pela própria empresa dos últimos dois anos, que foi o período onde ocorreram mais problemas no setor das caldeiras. Posteriormente, foram realizadas entrevistas com todos os quatro coordenadores responsáveis por este setor para preenchimento do formulário do FMEA. Os indivíduos envolvidos na pesquisa não foram identificados com o propósito de preservar seus interesses profissionais na empresa.

A Figura 1 ilustra uma síntese da sequência utilizada para realizar as etapas do FMEA:

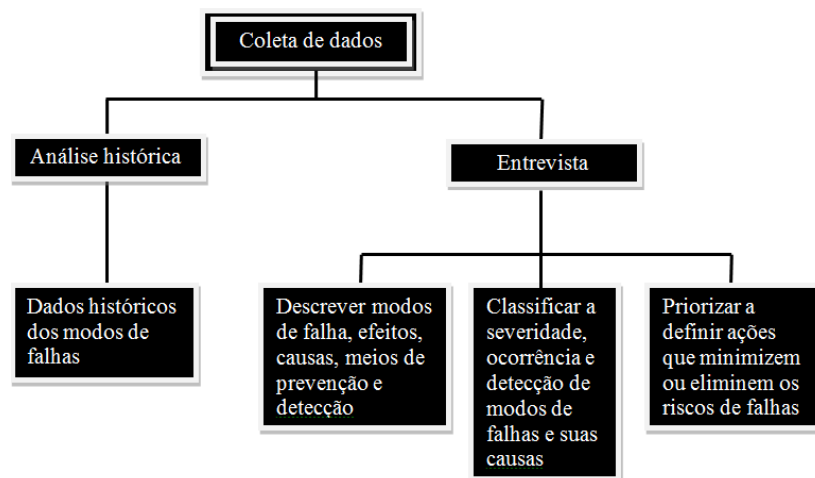


Figura 1: Síntese da elaboração do FMEA. Adaptado de Silva (2011).

Na Figura 2 pode ser observado o formulário estruturado para a construção do FMEA:

| Formulário FMEA (Análise de Modos e Efeitos de Falhas) |                       |                   |           |              |          |              |              |            |                 |       |
|--|-----------------------|-------------------|-----------|--------------|----------|--------------|--------------|------------|-----------------|-------|
| Descrição do Processo:                                 |                       |                   |           |              |          |              | Data:        |            |                 |       |
| Departamento:  |                       |                   |           |              |          |              | Página:      |            |                 |       |
|  |                       |                   |           |              |          |              | Responsável: |            |                 |       |
| Equipamentos ou componentes / Número do item ①         | Funções do processo ② | Modos de falhas ③ | Efeitos ④ | Severidade ⑤ | Causas ⑥ | Ocorrência ⑦ | Controles ⑧  | Detecção ⑨ | Recomendações ⑩ | RPN ⑪ |
|  |                       |                   |           |              |          |              |              |            |                 |       |

Figura 2: Formulário do FMEA. Adaptado de Palady (1997).

Para cada etapa do preenchimento do formulário foram feitas as seguintes perguntas que facilitaram nas entrevistas:

- ① Qual o equipamento ou componente?
- ② Quais as funções no processo?
- ③ Quais as falhas que podem ocorrer em relação à função do componente?
- ④ O que pode acontecer caso ocorra às falhas?
- ⑤ Utilizando a Tabela 1, qual a gravidade dos efeitos dos modos de falhas?

| Severidade do efeito  | Índices |
|---|---------|
| O efeito da falha praticamente não é percebido  | 1       |
| O efeito da falha provoca uma redução no desempenho do componente   | 2 – 3   |
| Componente sofre uma degradação progressiva   | 4 – 5   |
| Componente não desempenha sua função  | 6 – 7   |
| O efeito da falha afeta a eficiência do processo, ocasionando numa redução de potência ou até mesmo sua parada          | 8 – 9   |
| O efeito da falha pode afetar tanto a segurança operacional como a ambiental, podendo ocasionar danos a bens ou pessoas | 10      |

Tabela 1: Escala de severidade do efeito. Adaptado de Garcia (2006)

- ⑥ Quais motivos que levam esses modos de falhas ocorrerem?
- ⑦ Utilizando a Tabela 2, quais as chances destas falhas ocorrerem?

| Probabilidade de falhas | Índices  |
|-------------------------|----------|
| Remota                  | 1        |
| Baixa                   | 2 e 3    |
| Moderada                | 4, 5 e 6 |
| Alta                    | 7 e 8    |
| Muito alta              | 9 e 10   |

Tabela 2: Escala de avaliação da ocorrência. Adaptado de Garcia (2006)

- ⑧ O que pode ser feito para alertar ou detectar os modos de falhas ou as causas?
- ⑨ Utilizando a Tabela 3, quais as chances de se conseguir detectar os modos de falhas antes que estes ocorram?



| Probabilidade de detecção da causa da falha | Índices |
|---|---------|
| Probabilidade muito alta de detecção        | 1       |
| Probabilidade alta de detecção              | 2 – 3   |
| Probabilidade moderada de detecção          | 4 – 5   |
| Probabilidade pequena                       | 6 – 7   |
| Probabilidade muito pequena                 | 8 – 9   |
| Probabilidade remota                        | 10      |

Tabela 3: Escala de avaliação de detecção. Adaptado de Garcia (2006)

**10** Quais ações podem ser tomadas para prevenir as falhas?

Após preencher todo o formulário do FMEA, calculou-se o RPN **11** (Graus de Prioridade de Risco), através da multiplicação dos índices de Detecção, Ocorrências e Severidade, e com o resultado deste, conseguiu-se descobrir quais são os mais altos riscos de falhas. Depois disso, foram elaboradas medidas de contingência juntamente com os coordenadores para os modos de falhas de todos componentes, garantindo assim as primeiras considerações de melhorias.

E para finalizar, utilizando o Princípio de Pareto, que segundo Campos (2007), determina que 20% das causas geram 80% das consequências, sendo assim, priorizou-se os modos de falhas que representam um risco mais significativo para o setor, conseguindo-se obter os principais riscos de falhas.

**4. Estudo de Caso****4.1. A Empresa**

O trabalho foi desenvolvido a partir de dados obtidos em uma usina do interior do estado de São Paulo, essa usina foi fundada há quase 60 anos. Hoje em dia emprega cerca de 2100 colaboradores. A denominação da empresa será omitida com a finalidade de preservar seus interesses.

A usina possui uma área cultivada de cerca de 40 mil hectares de terras próprias, de parceiros e de fornecedores de cana.

Atualmente processa cerca de 3,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. A cada safra, produz aproximadamente 300 mil toneladas de açúcar de diversas especificações: açúcar VHP, açúcar refinado líquido, açúcar refinado granulado, açúcar cristal especial, açúcar cristal extra fino, açúcar cristal granulometria controlada e, açúcar cristal alta cor. E também produz, cerca de 130 milhões de litros de álcool anidro e hidratado. Além disso, produz 60 mil MW de energia elétrica aproveitando o bagaço da cana, garantindo assim a autossuficiência da usina.

Esta usina possui um índice de 85% de mecanização em sua colheita e, processa cana inteira e picada.

Em relação ao setor das caldeiras, que foi o escolhido para analisar os riscos de falhas, este possui 7 caldeiras para a produção de vapor, todas do tipo aquatubulares e possuem o mesmo princípio de funcionamento, com os mesmos tipos de equipamentos e a mesma pressão de trabalho de 21 kgf/cm<sup>2</sup>. Porém possuem diferença em relação à capacidade máxima que podem produzir, variando entre 85.000 kg/h a 125.000 kg/h.

A Figura 3 apresenta o esquema de uma caldeira, similar as utilizadas pela usina, com todos os equipamentos que auxiliam na geração do vapor:

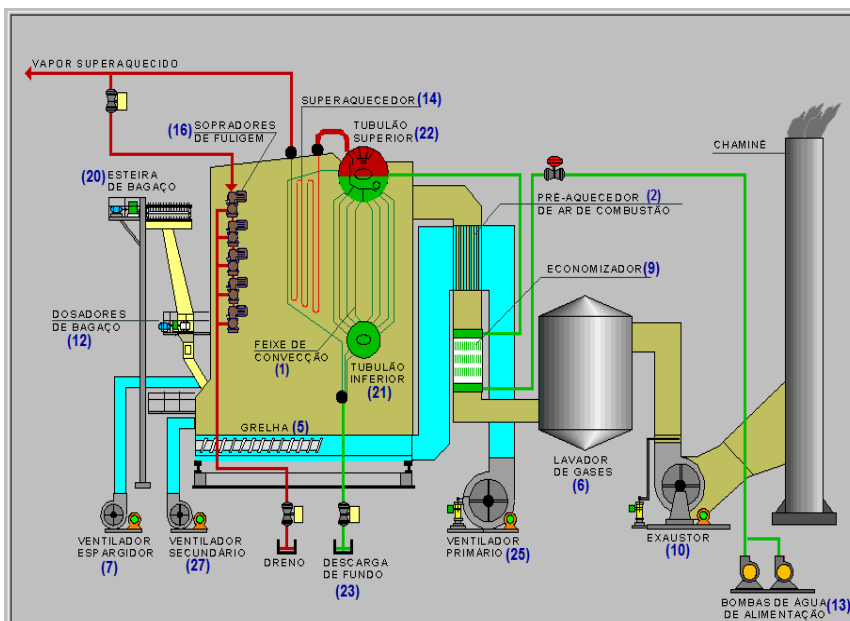


Figura 3: Esquema simplificado funcional da caldeira. Adaptado de SMAR (2011).

## 4.2. Resultados e Discussão

Após a realização dos procedimentos citados na seção metodologia para o levantamento dos dados, pode-se observar na Tabela 4 o formulário FMEA preenchido:

| Formulário FMEA (Análise de Modos e Efeitos de Falhas) |   |                                     |   |     |  |     |  |     |  |        |
|--|---|-------------------------------------|---|-----|--|-----|--|-----|--|--------|
| Descrição do Processo: Geração de Vapor                |   |                                     |   |     |  |     | Data: 25, 26, 27 e 28/10/2011  |     |  |        |
| Departamento: Caldeiras                                |   |                                     |   |     |  |     | Página: 1  |     |  |        |
|  |   |                                     |   |     |  |     | Responsável: Bruna C. O. Silva   |     |  |        |
| Equipamentos ou componentes / Número do item 1         | Funções no processo 2                                       | Modos de falhas 3                   | Efeitos 4   | S 5 | Causas 6   | O 7 | Controles 8  | D 9 | Recomendações 10   | RPN 11 |
| Feixe tubular (1)                                      | Fazer a ligação dos dois tubos da caldeira                  | Vazamento                           | Falta de água na caldeira (eficiência)  | 10  | Desgaste   | 8   | Ultrassom  | 8   | Boa qualidade matéria prima                                      | 640    |
| Pré aquecedor de ar (2)                                | Elevar a temperatura do ar antes que este entre na fornalha | Entupimento                         | Deficiência do ar para as caldeiras   | 7   | Má queima do combustível   | 6   | Controle da temperatura dos gases  | 7   | Limpeza interna  | 294    |
| Desaerador (3)   | Retirar o oxigênio da água                                  | Parar o equipamento                 | Baixa qualidade da água, reduzindo a eficiência                                   | 8   | Falta de água (problema na bomba)                                | 6   | Inspeção rotineira   | 6   | Aumentar oferta de combustível                                   | 288    |
| Bagaço (4)   | Combustível para as caldeiras                               | Má qualidade do bagaço              | Diminui a eficiência da caldeira  | 9   | Chuva, baixa carga da moenda, má qualidade da fibra              | 7   | Análises no laboratório  | 4   | Diminuir quantidade de água no processo de moagem da cana        | 252    |
| Grelhado (5)   | Queimar o bagaço  | Entortar o eixo                     | Baixa eficiência da caldeira  | 7   | Má operação, aquecimento e desgaste                              | 6   | Inspeção   | 5   | Fazer manutenção   | 210    |
| Lavador de gases (6)                                   | Lavar os gases que saem da caldeira                         | Entupimento de bico e falta de água | Fumaça escura, prejudica meio ambiente e gera mulfas                              | 9   | Problema da bomba,   | 7   | Inspeção   | 3   | Inspeção rotineira e limpeza                                     | 189    |
| Ventilador espargidor (7)                              | Espalhar o bagaço   | Entope quando para de funcionar     | Perda de produção   | 9   | Desarme, quebra correia  | 4   | Inspeção   | 5   | Inspeção rotineira   | 180    |
| Válvula de segurança (8)                               | Aliviar excesso de vapor acumulado na caldeira              | Travamento                          | Excesso de vapor na caldeira  | 9   | Quebra da retenção que ajusta até determinada pressão            | 5   | Observar nível de pressão (comparação a pressão do vapor de linha com a pressão da caldeira) | 3   | Ajuste da manutenção   | 135    |
| Economizador (9)                                       | Aumentar temperatura da água de alimentação da caldeira     | Vazamento (serpentina)              | Diminui a entrada de água nas caldeiras   | 7   | Desgaste   | 6   | Inspeccionar (barulho)   | 3   | Teste hidrostático   | 126    |
| Exaustor (10)  | Retirar os gases  | Falhas nos pistões, travamento      | Pressão positiva (pequenas explosões no interior da caldeira) joga fogo para fora | 8   | Sujeira, desbalanceamento (falha na turbina que aciona exaustor) | 5   | Inspeção   | 3   | Fazer a manutenção   | 120    |
| Coletor de vapor direto ou de escape (11)              | Alimentar as turbinas da usina para gerar energia           | Rompimento, vazamento               | Danificar partes em volta por causa da pressão do vapor                           | 10  | Desgaste, rompimento da solda                                    | 6   | Inspeção   | 2   | Inspeção mensal  | 120    |
| Alimentador de bagaço (12)                             | Fonecer o bagaço que será queimado na fornalha da caldeira  | Falta de bagaço (combustível)       | Baixa pressão do vapor, parada do processo  | 9   | Baixa carga das moendas  | 6   | Diminuir quantidade de combustíveis e aumentar ar nas caldeiras                              | 2   | Controle do processo contínuo de bagaço                          | 108    |
| Turbo bomba (13)                                       | Mandar água para as caldeiras                               | Falta de água                       | Secar caldeira (explosão)   | 10  | Desarme ou queima dos equipamentos                               | 5   | Verificar nível das caldeiras  | 2   | Indicadores no painel, equipamento de controle do nível de vazão | 100    |

|  |   |   |   |    |  |   |                          |   |                            |    |
|--|---|---|---|----|--|---|--------------------------|---|----------------------------|----|
| Serpentina ou superaquecedor (14)                  | Transformar o vapor saturado em vapor superaquecido         | Vazamento   | Eficiência caldeira, furar tubo (feixe tubular)   | 8  | Desgaste   | 6 | Barulho interno caldeira | 2 | Matéria prima (água/vapor) | 96 |
| Balão de arraste (15)                              | Eliminar gotículas de água da linha de vapor                | Falha nos purgadores (válvula automática) ou travamento da válvula direta | Água nas turbinas, diminui eficiência do vapor  | 5  | Nível alto de água da caldeira, encrostamento, sujeira, contaminação (caldo na água) | 6 | Inspeção rotineira       | 3 | Fazer a manutenção         | 90 |
| Soprador de fuligem (16)                           | Fazer a remoção da fuligem e depósitos formados na caldeira | Quebra do equipamento   | Acúmulo de cinza  | 7  | Falta de vapor   | 4 | Inspeção                 | 3 | Fazer a manutenção         | 84 |
| Válvula de alimentação (17)                        | Fazer a alimentação de água nas caldeiras                   | Falha de instrumento  | Baixo nível de água na caldeira   | 10 | Falha transmissor  | 3 | Inspeção                 | 2 | Fazer a manutenção         | 60 |
| Tubo coletor de água (18)                          | Alimenta as caldeiras                                       | Rompimento, vazamento   | Falta de água (risco de explosão)   | 10 | Desgaste, rompimento da solda  | 3 | Inspeção                 | 2 | Inspeção mensal            | 60 |
| Chicana (19)                                       | Dirige o caminho dos gases                                  | Rompimento, quebra, desviar os gases                                      | Prejudica a estrutura da caldeira   | 4  | Desgaste   | 7 | Escape dos gases         | 2 | Reparos e manutenção       | 56 |
| Esteira (20)                                       | Transportar o bagaço para as caldeiras                      | Entupimento, travamento   | Para de alimentar a caldeira com combustível  | 9  | Desarme, quebra  | 5 | Inspeção rotineira       | 1 | Fazer a manutenção         | 45 |
| Tubulão inferior (21)                              | Depósito 100% de água, decantador de lama                   | Vazamento   | Baixo nível de água   | 10 | Rompimento da junta (desgaste)   | 2 | Inspeção rotineira       | 2 | Fazer a manutenção         | 40 |
| Tubulão superior (22)                              | Depósito de 50% de água e 50% vapor, mistura água/vapor     | Vazamento   | Baixo nível de água   | 10 | Rompimento da junta (desgaste)   | 2 | Inspeção rotineira       | 2 | Fazer a manutenção         | 40 |
| Descarga de fundo (23)                             | Eliminar o lodo   | Para de funcionar   | Aumento de sólidos na caldeira e aumento do PH  | 4  | Entupimento, travamento  | 4 | Inspeção rotineira       | 2 | Fazer a manutenção         | 32 |
| Bomba de dosagem de produto químico para água (24) | Limpeza e controle PH, encrostamento                        | Parar bomba   | Diminui a entrada do produto com a água na caldeira, diferença de PH e aumenta a encrostação interna da tubulação | 8  | Desarme, travamento  | 2 | Inspeção rotineira       | 2 | Fazer a manutenção         | 32 |
| Ventilador principal (25)                          | Pressurizar ar por baixo do grelhado                        | Parar equipamento   | Diminui eficiência da caldeira  | 6  | Desarme  | 2 | Inspeção                 | 2 | Inspeções rotineiras       | 24 |
| Coletor de parede d'água (26)                      | Aproveitamento da água de aquecimento                       | Vazamento interno ou externo  | Parar caldeira (vazamento grande)   | 7  | Rompimento da junta  | 2 | Inspeção                 | 1 | Fazer a manutenção         | 14 |
| Ventilador secundário (27)                         | Complemento de ar na caldeira                               | Parar equipamento   | Monte de bagaço sobre o grelhado  | 1  | Desarme  | 1 | Inspeção                 | 8 | Inspeção                   | 8  |
| Válvula de linha de vapor (28)                     | Regula o vapor da linha                                     | Estouro de junta  | Barulho vapor   | 1  | Desgaste   | 2 | Inspeção                 | 1 | Fazer a manutenção         | 2  |

Tabela 4: Formulário do FMEA preenchido.

Como mostra a Figura 4, conseguiu-se estabelecer o modo de falha mais relevante para cada componente listado no formulário, o que corresponde a 28 modos de falhas que podem ocorrer e que interferem direta ou indiretamente no processo de geração de vapor.

Apesar do RPN ter variado bastante, de 640 a 2, todos os equipamentos e componentes listados no formulário desempenham funções bastante importantes. Para fazer o detalhamento das falhas, utilizou-se o Princípio de Pareto para determinar quais os modos de falha são os mais críticos para o processo.

Na Figura 4, pode-se verificar que os 80% dos componentes mais críticos representam 13 dos equipamentos em que seus RPN variam de 640 a 100.



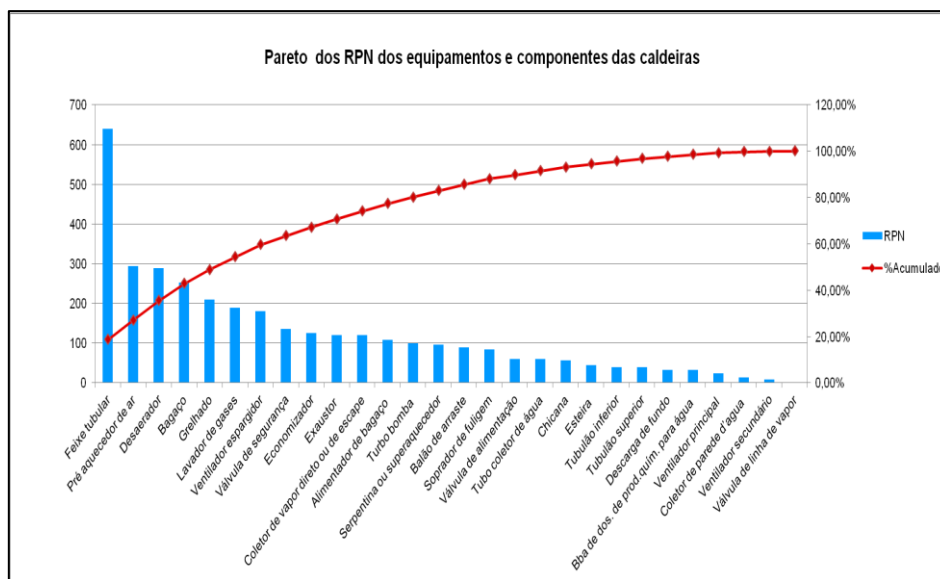


Figura 4: Aplicação do princípio de Pareto

Em relação às chances de se conseguir detectar um modo de falha antes que este ocorra, nota-se que em 75% dos componentes, que apresentaram índice de detecção maior ou igual ou menor que 3 (vide Tabela 3), são altas as chances. Sendo isso possível, pelo fato de serem utilizados controles que monitoram a todo o momento o processo de geração de vapor.

Apesar dos índices baixos de ocorrência das falhas observados no Gráfico 3, os componentes acabam falhando e, quando isso acontece, necessita-se de medidas de contingência ou planos de ação corretiva, para agir rapidamente nessas situações. Dessa forma, na Tabela 4 foram listadas as medidas contingência que devem ser tomadas para corrigir a falha na ocorrência da mesma.

| Equipamentos ou componentes / Número do item | RPN | Medidas de contingência  | Necessita parar caldeira |
|--|-----|--|--------------------------|
| Feixe tubular (1)                            | 640 | Eliminar vazamento (soldar ou isolar tubo)                             | Sim                      |
| Pré aquecedor de ar (2)                      | 294 | Fazer a limpeza para desentupir  | Sim                      |
| Desaerador (3)                               | 288 | Fazer manutenção corretiva na bomba que manda a água para o desaerador | Não                      |
| Bagaço (4)                                   | 252 | Aciona bagaço de retorno para reposição (pátio de bagaço)              | Não                      |
| Grelhado (5)                                 | 210 | Alinhamento dos eixos  | Sim                      |
| Lavador de gases (6)                         | 189 | Fazer manutenção corretiva na bomba e limpeza dos bicos                | Não                      |
| Ventilador espargidor (7)                    | 180 | Fazer manutenção corretiva na equipamento                              | Não                      |
| Válvula de segurança (8)                     | 135 | Ajuste da válvula (tirar de operação)                                  | Sim                      |
| Economizador (9)                             | 126 | Fazer manutenção corretiva para eliminar o vazamento (isolar tubo)     | Sim                      |
| Exaustor (10)                                | 120 | Fazer manutenção corretiva   | Sim                      |
| Coletor de vapor direto ou de escape (11)    | 120 | Trocar a extensão do tubo com desgaste, ou refazer solda               | Sim                      |
| Alimentador de bagaço (12)                   | 108 | Utilizar retorno de bagaço ou bagaço reserva                           | Não                      |
| Turbo bomba (13)                             | 100 | Fazer manutenção corretiva   | Não                      |
| Serpentina ou superaquecedor (14)            | 96  | Eliminar vazamento (soldar ou isolar tubo)                             | Sim                      |
| Balão de arraste (15)                        | 90  | Fazer manutenção corretiva (problema                                   | Sim                      |

|  |    |  |     |
|--|----|--|-----|
|  |    | interno)   |     |
| Soprador de fuligem (16)                           | 84 | Fazer manutenção corretiva                               | Sim |
| Válvula de alimentação (17)                        | 60 | Fazer ajustes na válvula                                 | Sim |
| Tubo coletor de água (18)                          | 60 | Trocar a extensão do tubo com desgaste, ou refazer solda | Sim |
| Chicana (19)                                       | 56 | Fazer manutenção corretiva de alvenaria                  | Não |
| Esteira (20)                                       | 45 | Fazer manutenção corretiva na esteira                    | Não |
| Tubulão inferior (21)                              | 40 | Eliminar vazamento (soldar ou isolar tubo)               | Sim |
| Tubulão superior (22)                              | 40 | Trocar a extensão do tubo com desgaste, ou refazer solda | Sim |
| Descarga de fundo (23)                             | 32 | Fazer manutenção corretiva                               | Não |
| Bomba de dosagem de produto químico para água (24) | 32 | Fazer manutenção corretiva                               | Não |
| Ventilador principal (25)                          | 24 | Fazer manutenção corretiva                               | Não |
| Coletor de parede d'água (26)                      | 14 | Eliminar vazamento (interno)                             | Sim |
| Ventilador secundário (27)                         | 8  | Fazer manutenção corretiva                               | Não |
| Válvula de linha de vapor (28)                     | 2  | Fazer ajustes na válvula                                 | Sim |

Tabela 5: Medidas de contingência para a ocorrência do modo de falha

Dentre os componentes listados, 57% necessitam a parada da caldeira para realizar as manutenções, porém, não necessariamente precisa ser parado imediatamente o processo na caldeira, muitas das manutenções podem ser deixadas para serem realizadas quando houver uma parada programada. Entre esses, alguns componentes, como o caso do coletor de vapor direto, necessitam a parada de todas as caldeiras.

Com a aplicação da ferramenta FMEA pode-se analisar detalhadamente os riscos de falhas que podem ocorrer, conseguindo-se assim, descrever as medidas que podem ser tomadas tanto para prevenir, quanto para corrigir os equipamentos através das manutenções.

### 5. Considerações finais

A aplicação do FMEA no setor das caldeiras de uma usina do setor sucroenergético possibilitou enumerar diversos modos de falha nesse setor.

Após a análise realizada a partir dos dados levantados, conseguiu-se identificar que, apesar de ser um setor crítico com grandes riscos a segurança dos equipamentos e a vida das pessoas, é possível através do controle com manutenções preditivas e preventivas, uma diminuição da probabilidade de ocorrência de falhas em alguns equipamentos, sendo possível também, a rápida detecção das falhas através dos controles, monitoramentos e das inspeções.

Além disso, conclui-se que o método FMEA é adequado para mapear os modos de falhas dos componentes e para analisá-los aos seus efeitos e causas. Foram propostas ações de controle para todas as falhas listadas no formulário, gerando recomendações para prevenir as falhas através da manutenção preventiva, planos de contingência, para eventuais ocorrências das falhas.

Esse trabalho limitou-se ao processo de geração de vapor, obtendo-se a principal falha em cada equipamento do sistema. Para futuros trabalhos, esse método pode ser aplicado em outros setores da usina, considerando-se as ações de manutenção em relação aos processos ou, detalhando-se ainda cada um dos componentes, até mesmo da própria caldeira, com um alto grau de criticidade.

Por fim, este trabalho proporcionou não apenas uma contribuição acadêmica, ao analisar a aplicação do método FMEA, mas também uma contribuição com sua aplicação para a usina, permitindo maior segurança para os processos e principalmente a vida dos funcionários.

### Referências

ALVES, A. J. Estudo de caso da importância da manutenção preditiva com ênfase na análise de vibração em uma usina sucroalcooleira. Monografia apresentada à Coordenação Geral de Graduação do UNIFOR-MG como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, Formiga – MG, 2009.

BENTES, F. M. Programa de gestão de risco para tubulações industriais. Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências Mecânicas, Brasília – DF, 2007.

CAMPOS, A. Sistema de Segurança da informação: Controlando os Riscos. 2ª ed. Florianópolis: Visual Books, 2007.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 17 set. 2011

DANTAS, D. N. Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exérgica e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental, São Carlos – SP, 2010.

GARCIA, P. A. A. Uma abordagem Fuzzy com envelopamento dos dados da análise dos modos e efeitos de falha. Tese submetida ao corpo docente da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências em Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro – RJ, 2006.

GONÇALVES, A. Um estudo da implantação da FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) sob a ótica de Gerenciamento de Projetos. Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Campinas – SP, 2006.

LEITE, N. R.; MILITÃO, R. A. Tipos e aplicações de caldeiras. Prominp (Programa de Mobilização da Indústria Nacional de Petróleo e Gás Natural), São Paulo – SP, 2008.

LEAL, F.; PINHO, A. F.; ALMEIDA, D. A. Análise de falhas através da aplicação do FMEA e da Teoria Grey. Revista Gestão Industrial, Ponta Grossa – PR, v. 02, n. 1, p. 78-88, 2006.

LIMA, P. F. A., et al. Proposta de utilização do FTA como ferramenta de apoio ao FMEA em uma empresa do ramo automotivo. In: Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), XIII, Bauru – SP, 2006.

MENTE, E. M. M. Aplicação de ferramentas do pensamento enxuto na redução de perdas na indústria sucroenergética: um estudo de caso. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Produção, Bauru - SP, 2010.

OLIVEIRA, J. G. Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucro-alcooleiro paulista. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, São Carlos – SP, 2007.

PALADY, P. FMEA Análise dos Modos de Falhas e Efeitos – Prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram. 1ª ed. São Paulo: IMAM, 1997.

PARDO, J. A. R. Metodologia para análise e gestão de riscos em projetos de pavimentos ferroviários. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geotecnia, Ouro Preto – MG, 2009.

SANT’ ANNA, A. P.; JUNIOR, R. P. S. P. Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA. Revista Eletrônica Sistemas & Gestão, Niterói – RJ, v. 5, n. 3, p. 179-191, 2010.

SILVA, Bruna Carolina Oliveira. Mapeamento e análise de riscos de falhas através da aplicação do método FMEA: Centro Universitário Hermínio Ometto - UNIARARAS, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Eng. Mecânica).

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. 3ª ed. Florianópolis – SC: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SILVA, R. L. A., et al. Análise de risco utilizando a ferramenta FMEA em um gerador de vapor. In: Encontro Nacional de Engenharia De Produção (ENEGEP), XXVIII, Rio de Janeiro – RJ, 2008.

SMAR. Automação Industrial. Disponível em: <<http://www.smar.com>>. Acesso em: 24 out. 2011.

SOUZA, R. Q. Metodologia e desenvolvimento de um sistema de manutenção preditiva visando à melhoria da confiabilidade e ativos de usinas hidrelétricas. Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Sistemas Mecatrônicos, Brasília – DF, 2008.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 17 set. 2011.

YIN, R.K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.