

APLICAÇÃO DO *FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS* NA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS E QUEBRAS DE UM MISTURADOR DE REAGENTES QUÍMICOS

Autores: Caio Vinicius Molina Ferreira - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – Curso de Engenharia de Produção – CPTL
caiomolinf@gmail.com

Diego Gilberto Ferber Pineyrua – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – Curso de Engenharia de Produção – CPTL
ferber.ufms@gmail.com

RESUMO

Falhas em misturadores em indústrias de celulose podem gerar um aumento de custos com manutenção, mão de obra, perda de produção, comprometendo também a qualidade final da celulose vendida ao mercado. Este trabalho teve como objetivo identificar os modos de falhas potenciais do misturador de reagentes químicos, bem como suas causas e efeitos. Para isso, foi apresentada toda a metodologia de aplicação do *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), pontuando os potenciais modos de falhas do misturador de reagentes químicos, propondo, assim, soluções de melhoria para este equipamento. Em paralelo com o FMEA, foi demonstrado aplicações técnicas computacionais com o auxílio de *Computer Aided Design* (CAD), os quais foram essenciais na identificação das causas potenciais dos modos de falhas nestes equipamentos de grande importância para a indústria de celulose. A aplicação do FMEA para o misturador de reagentes químicos com a assistência de CAD mostrou-se muito eficaz, com o qual foi possível propor soluções de melhoria para o equipamento do sistema de produção de celulose.

Palavras-chaves: FMEA, Misturador Reagentes Químicos, Modos de Falhas, CAD.

INTRODUÇÃO

Uma das áreas da indústria com grande influência na produção é a área de manutenção e como está aplicada a uma unidade fabril. A manutenção pode influenciar diretamente na qualidade dos produtos fabricados, pois quando bem gerida e planejada, aumenta-se a disponibilidade de máquinas, aumentando a produtividade e diminuindo paradas em equipamentos. De acordo com Tavares (1998), existem responsabilidades relacionadas à manutenção, como a redução da paralisação dos equipa-

mentos que afetam a operação, o reparo em tempo hábil das ocorrências que reduzem o potencial de execução dos serviços e a garantia de funcionamento das instalações, de forma que os produtos ou serviços atendam os critérios estabelecidos pelo controle da qualidade e a padrões preestabelecidos.

Na busca de uma melhor competitividade no setor industrial, não é mais aceitável para uma unidade fabril que um equipamento ou sistema pare ou apresente falhas de maneira não prevista (KARDEC, NASCIF, BARONI, 2002).

Para evitar que tal fato ocorra, pode-se utilizar do sistema *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) – Análise de Modo e Efeito de Falha – uma ferramenta essencial na identificação de falhas potenciais em equipamentos, sistemas ou processos. Para Borrer (2008), FMEA pretende ajudar os usuários a identificar e eliminar ou reduzir os efeitos negativos de potenciais falhas antes de elas ocorrerem em sistemas, subsistemas, projetos de produtos ou processos, ou mesmo na entrega de um serviço. Além disso, por meio do FMEA é possível fornecer as recomendações para as ações preventivas, aumentando a confiabilidade do equipamento e do processo, reduzindo principalmente o custo com manutenções corretivas.

O sistema produtivo de polpa celulósica é baseado, principalmente, em uma linha única de produção em que a parada de alguma das máquinas desta linha pode ocasionar na parada total da linha. Os equipamentos e máquinas são de grande porte e apresentam características exclusivas para a produção da celulose. Alguns exemplos de máquinas são: *reclaimer*, digestor, misturador, depuradores, reatores e outros. Todas são fundamentais para o processo de produção da celulose. A parada do digestor, onde ocorre a etapa de cozimento dos cavacos de eucalipto, por exemplo, pode ocasionar na parada total da fábrica.

Autor correspondente: Diego Gilberto Ferber Pineyrua – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – Curso de Engenharia de Produção – CPTL – ferber.ufms@gmail.com

Partindo-se do histórico de ocorrências, intervenções e falhas do misturador de reagentes químicos, da indústria fabril de polpa celulósica em estudo, no período de 2013 a 2016, ocorreram 15 trocas e reparos de rotores. Este artigo apresenta a aplicação da ferramenta FMEA, buscando responder aos seguintes problemas de pesquisa: quais são as falhas mais comuns, em quais componentes essas falhas ocorrem, em especial o rotor fluidificante e o eixo, quais problemas têm influência sobre as falhas, e qual o efeito dessas falhas nos componentes e no misturador em geral.

Objetivo geral deste trabalho foi explanar os modos de falhas do misturador de reagentes químicos, suas causas e efeitos, propondo melhorias para tais, por meio da aplicação da ferramenta FMEA e paralelamente com o auxílio de *Computer Aided Design* (CAD) – Projeto Assistido por Computador – na identificação desses modos de falha.

METODOLOGIA

Segundo Kardec e Nascif (2001), o objetivo do FMEA é ajudar a identificar e priorizar falhas potenciais em equipamentos, sistemas ou processos. Além disso, o FMEA é um sistema lógico que hierarquiza as falhas potenciais e fornece as recomendações para as ações preventivas. Para cumprir estes objetivos, uma metodologia para a construção do FMEA deve ser seguida. Especialistas indicam que existem três níveis de FMEA: projeto, processo e sistema (KARDEC e NASCIF 2001). Um time de profissionais capacitados deve ser montado para a aplicação do FMEA, a crença de que apenas uma ou duas pessoas mais próximas ao sistema, subsistema, produto ou projeto deveriam ser responsáveis pelo FMEA, viola, em um todo, a intenção da análise (BORROR, 2008). Portanto, o FMEA deve estar composto e representado por um time de experts de diversas áreas.

Para elaborar um FMEA, foi necessário coletar informações de diversas fontes, e que devem ser realizadas antes de uma reunião inicial com o time do FMEA, a fim de maximizar a efetividade da reunião. As principais informações coletadas foram:

- Fluxograma de processo ou diagrama de bloco funcional;
- Especificações de projeto;
- Resultados/dados de testes;
- Dados de processos/projetos com tecnologia similar;
- Dados de falhas/retrabalho;
- Dados de mudança de projeto/configuração.

A estruturação para a aplicação do FMEA (STAMATIS, 2005), para atender ao objetivo deste trabalho, apresentou os seguintes informativos:

a) Modo de Falha Potencial: é definido como a maneira pela qual um componente, subsistema ou sistema potencialmente falharia ao cumprir o objetivo/função do projeto. O modo de falha potencial pode ser também a causa de uma falha potencial em um sistema ou subsistema de um nível superior, ou ser o efeito de um componente em um nível inferior.

b) Efeito(s) Potencial(ais) da Falha: são definidos como os efeitos do modo de falha na função, como percebido pelo cliente. Descrever os efeitos da falha em termos que o cliente possa perceber ou experimentar. Lembre-se que o cliente pode ser interno ou o cliente final. Definir claramente se a função poderia afetar a segurança ou o descumprimento dos regulamentos/legislação. Os efeitos devem sempre ser definidos em termos de um sistema, subsistema ou componente específico que está sendo analisado. Lembre-se que existe uma hierarquia entre os níveis de componente, subsistema e sistema. Por exemplo, uma peça pode quebrar, o que pode causar vibração em um conjunto, resultando em operação intermitente do sistema. A operação intermitente do sistema poderia causar degradação do desempenho, levando o cliente à insatisfação. O objetivo é prever os efeitos da falha ao nível de conhecimento da equipe.

c) Índice de Severidade (S): uma avaliação da gravidade do efeito do modo de falha potencial para o próximo componente, subsistema, sistema ou cliente. A severidade se aplica somente ao efeito. A redução no índice de severidade pode ser conseguida apenas por meio de alteração do projeto. A severidade deveria ser estimada em uma escala de “1” a “10”;

d) Causa(s) e Mecanismo(s) Potencial(ais) da Falha: é definida como uma indicação de uma deficiência do projeto, cuja consequência é o modo de falha. Listar, de forma mais completa possível, todos os mecanismos e/ou causas de falha concebíveis para cada modo de falha. O mecanismo/causa deve ser listado tão completo e concisamente quanto possível para que medidas preventivas possam ser aplicadas às causas pertinentes.

e) Número de Prioridade de Risco (Risk Priority Number – RPN): é o produto dos índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D). É uma medida do risco do projeto. Este número deve ser utilizado para priorizar as deficiências do projeto. O NPR varia entre “1” a “1000”. Para NPRs altos a equipe deve concentrar esforços a fim de reduzir o risco calculado através de ações corretivas.

f) Ações Recomendadas: quando os modos de falha estiverem classificados pelo Número de Prioridade de Risco (NPR), devem ser propostas e ações corretivas para os itens críticos e com altos índices de NPR. O objetivo das ações recomendadas é reduzir o índice de ocorrência, de severidade ou de detecção. Uma melhoria de eficácia das ações de verificação/validação resultará em uma redução apenas no índice de detecção. A redução no índice de ocorrência só pode ser atingida pela eliminação ou controle de uma ou mais causas/mecanismos potenciais de falha, por meio de alterações do projeto. Apenas uma alteração de projeto pode causar uma redução no índice de severidade.

O tipo de FMEA utilizado para que a análise seja feita de forma correta, de acordo com Stamatis (2005) e Borrór (2008), foi:

- FMEA de Sistema: aplicado ao sistema ou subsistema para identificar potenciais modos de falhas e efeitos que podem impactar negativamente sua performance. Além disso, Kardec e Nascif (2001) enfatizam que este tipo de FMEA se preocupa com falhas potenciais e gargalos no processo global, como por exemplo em uma linha de produção.
- FMEA de Projeto: aplicado aos projetos de produto, especialmente no início do projeto, para identificar possíveis modos de falha que poderiam comprometer o projeto. Essas possíveis falhas estão ligadas a todos os aspectos que envolvem o produto como: funções principais, parâmetros de operação e tolerância, materiais, dimensões, entre outros.

RESULTADOS

1. Principais modos de falha do misturador de reagentes químicos (MQ)

O primeiro aspecto analisado para o preenchimento do FMEA foi a identificação dos modos de falha do MQ, Figuras 1, 2 e 3, para isso, a equipe de Engenharia de Manutenção Mecânica da empresa destacou os seguintes modos de falha:

- Desgaste do Rotor Fluidificante (RF);
- Quebra do Eixo;
- Falha no Selo Mecânico: expelindo polpa de celulose.
- Quebra do Acoplamento.

2. Efeitos e índice de severidade dos principais modos de falha

Após a identificação dos principais modos de falha do MQ, a Tabela 1 apresenta os efeitos e o índice de severi-



Figura 1 – Rotor Fluidificante Desgastado Fonte: Autores



Figura 2 – Eixo do MQ Quebrado Fonte: Autores



Figura 3 – Quebra do Acoplamento Fonte: Autores

Tabela 1 – Efeitos e índice de severidade dos principais modos de falha

Modo de Falha	Efeitos	Índice de Severidade (S)
1) Quebra do Rotor Fluidificante (RF)	A quebra do RF pode acarretar na: perda da qualidade da celulose, perda de produção, quebra de outros componentes do MQ, bem como a parada do equipamento.	8 - O MQ torna-se inoperável e perde sua função primária, devido à parada do equipamento.
2) Quebra do eixo	A quebra do RF pode acarretar na: perda da qualidade da celulose, perda de produção, quebra de outros componentes do MQ, bem como a parada do equipamento.	8 - O MQ torna-se inoperável e perde sua função primária, devido à parada do equipamento.
3) Falha do selo mecânico	A falha do selo mecânico gera vazamento de celulose para o meio externo, perda de produção por parada do equipamento para manutenção, além disso o vazamento de celulose pode ocasionar a contaminação no mancal do MQ.	7 - O MQ continua operando, mas perde desempenho. Em algum momento deve ser parado para manutenção.
4) Quebra do acoplamento	A quebra do acoplamento acarreta na parada do MQ e afetando na qualidade da celulose.	8 - O MQ torna-se inoperável e perde sua função primária, devido à parada do equipamento.

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 2 – Causas Potenciais e Índice de Ocorrência dos Principais Modos de Falha

Modo de Falha	Causas Potenciais	Índice de Ocorrência (O)
1) Quebra do Rotor Fluidificante (RF)	1.1) Geometria do RF inadequada.	8 - Alta
	1.2) Impacto por objeto estranho, proveniente do processo.	8 - Alta
2) Quebra do eixo	2.1) Dimensionamento inadequado do Eixo.	8 - Alta
	2.2) Impacto por objeto estranho no RF, proveniente do processo, excedendo o esforço no eixo.	8 - Alta
3) Falha do selo mecânico	3.1) Impacto por objeto estranho no RF, proveniente do processo, causando deslocamento, dano e folga do selo mecânico.	8 - Alta
4) Quebra do acoplamento	4.1) Impacto por objeto estranho no RF, proveniente do processo, causando deslocamento e quebra do acoplamento.	8 - Alta

Fonte: Elaborado pelos autores

dade para cada um dos modos de falhas identificados. Os efeitos são informações dos próprios eventos que ocorreram entre 2013 e 2016 no MQ em estudo.

3. Causas potenciais e índice de ocorrência dos principais modos de falha

Nessa etapa as causas potenciais e índice de ocorrência foram pontuadas na Tabela 2. As causas potenciais e o índice de ocorrência foram estipulados por meio de discussões, reuniões e análises de falhas feitas entre o Time de Engenharia de Manutenção e Operação da Empresa Estudada.

4. Controles atuais de prevenção e índice de detecção

Os controles atuais de prevenção e seus respectivos índices de detecção estão apresentados na Tabela 3. Os índices foram estipulados de acordo com a experiência da Equipe

de Engenharia de Manutenção e Operação da empresa estudada, baseado em históricos de falhas e relatórios. As causas da Tabela 2, para cada um dos quatro modos de falha, pontuadas como sendo 1.2, 2.2, 3.1 e 4.1 serão consideradas em conjunto, pois as mesmas possuem a mesma característica, que nesse caso é o impacto por objeto estranho. Dessa forma, a denominação para este conjunto será: 1.2) Impacto por objeto estranho, proveniente do processo.

Pode-se agora determinar o índice NPR, Tabela 4, o número de prioridade de risco, para cada causa potencial dos modos de falha, aplicando a seguinte equação:

$$NPR=(S).(O).(D)$$

onde, S = Índice de severidade, O = Índice de ocorrência e D = Índice de detecção.

Tabela 3 – Controles Atuais de Prevenção e Índice de Detecção das Causas Potenciais

Causas Potenciais	Controles Atuais de Prevenção	Índice de Detecção (D)
1.1) Geometria do RF inadequada.	Tentativas de alteração da geometria do rotor e manutenções corretivas após a quebra.	8 - Remota
1.2) Impacto por objeto estranho, proveniente do processo.	Detectores de metais e eletroímãs, para evitar o arraste de objetos para o processo.	3 - Alta
2.1) Dimensionamento inadequado do Eixo.	Nenhum controle atual.	8 - Remota

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 4 – Índice NPR para as Causas Potenciais de Falha

Causas Potenciais	Índice NPR
1.1) Geometria do RF inadequada.	(8).(8).(8) = 512
2.1) Dimensionamento inadequado do Eixo.	(8).(8).(8) = 512
1.2) Impacto por objeto estranho, proveniente do processo.	(8).(8).(3) = 192

Fonte: Elaborado pelos autores

5. Métodos propostos para a prevenção das causas potenciais

Os índices NPR, encontrados na seção anterior, dão prioridade na tratativa de cada causa potencial dos modos de falha. No entanto, é necessário identificar o mecanismo dos modos de falha apresentados e realizar uma investigação mais apurada de quais fatores estão mais ligados às causas potenciais. Além disso, é preciso melhorar os atuais métodos de prevenção destas falhas, os quais se apresentam incapazes de solucionar a causa dos modos de falha do MQ.

Foi utilizado o programa computacional CAD na investigação dos fatores que estão mais ligados às causas potenciais 1.1: geometria do RF inadequada e 2.1: dimensionamento inadequado do eixo. Para a causa do impacto por objeto estranho, proveniente do processo, foi realizada uma análise de sistema de separação e detecção de objetos estranhos.

Será apresentado a seguir o uso do CAD na identificação dos modos de falha do misturador químico na causa potencial identificada da quebra do rotor fluidificante (RF).

6. Resultados da análise da causa de quebra do rotor fluidificante por meio do programa computacional CAD

1. RF de aço inoxidável instalado antes da depuração.

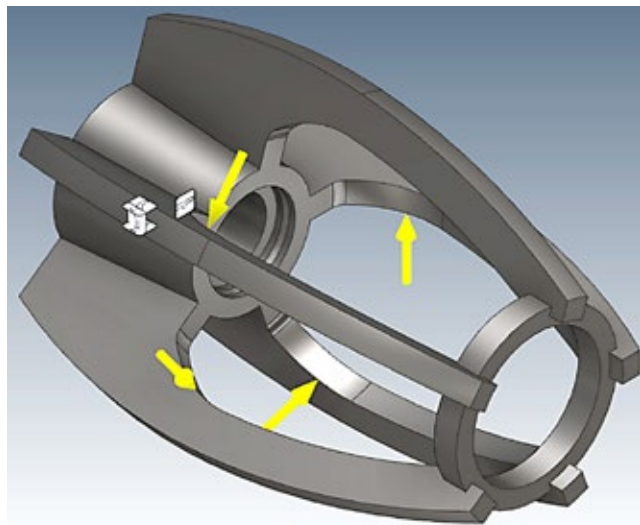


Figura 4 – Modelo 3D do RF de Aço Inoxidável
Fonte: Elaborado pelos autores

Os vetores em amarelo, na Figura 4, indicam as forças aplicadas sob as aletas do RF, que no caso é igual a 4,32 kN. Com isso, a análise de elementos finitos pôde ser executada no aplicativo Autodesk® Inventor (NORTON 2013). O resultado da análise pode ser visto na Figura 5, a escala de magnitude da tensão no RF está logo a esquerda e varia de 0 a 44,58 MPa, sendo 44,58 MPa a tensão crítica ou máxima (HIBBELER 2015).

A imagem ampliada da localização da tensão mostrada na Figura 6 é, mais especificamente, um refinamento

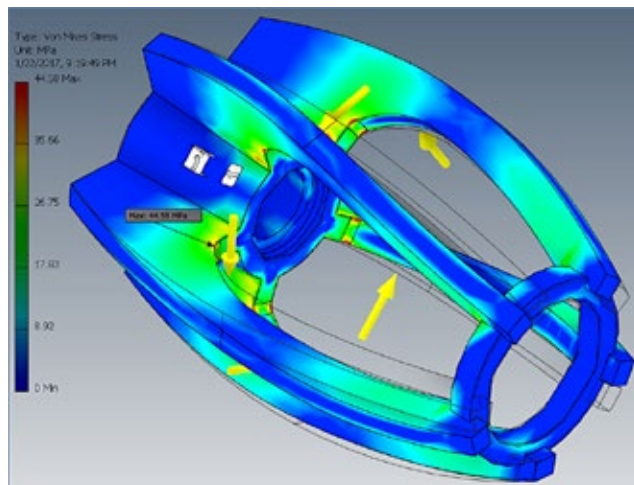


Figura 5 – Resultado da Análise de Elementos finitos do RF de Aço Inoxidável
Fonte: Elaborado pelos autores

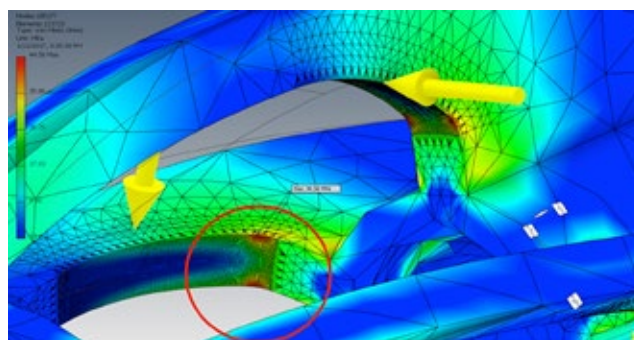


Figura 6 – Localização da Tensão Crítica no RF Original de Aço Inoxidável
Fonte: Elaborado pelos autores

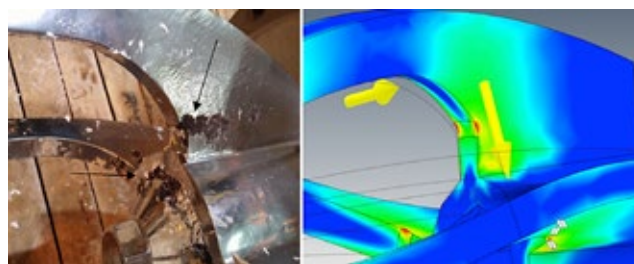


Figura 7 – RF Real de Aço Inoxidável x RF Simulado
Fonte: Elaborado pelos autores

da região de concentração de tensão que foi feito para obter um valor mais próximo do real. Portanto, o RF está propício a sofrer maiores esforços nesse ponto, bem como nas outras regiões em vermelho. Percebeu-se que elas se localizam e estão distribuídas uniformemente em cada uma das aletas do RF.

A Figura 7, mostra um comparativo com uma foto real do RF de aço inoxidável, onde aparece a formação da trinca identificada. Coincidentemente, a tensão crítica, encontrada por intermédio da análise de elementos finitos, está localizada no mesmo ponto no qual ocorre a formação de trinca no RF simulado. As regiões em vermelho mostram onde estão localizadas as concentrações de tensões.



Figura 8 – RF Original de Aço Inoxidável Quebrado
Fonte: Elaborado pelos autores

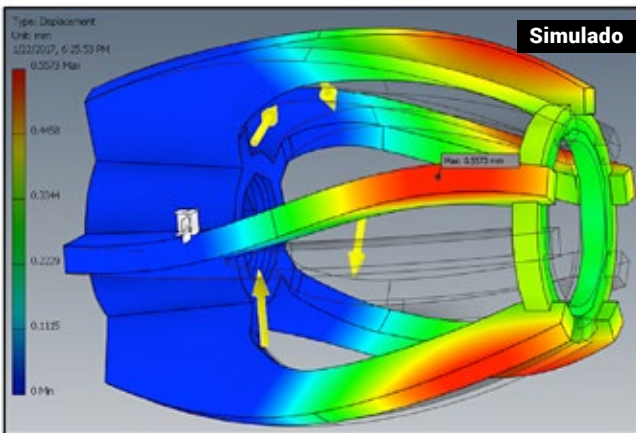


Figura 9 – Deflexão do RF Real x RF Simulado
Fonte: Elaborado pelos autores

Na Figura 8 pode-se ver a característica de ruptura do RF, no qual ocorre de forma uniforme, pois as tensões críticas estão localizadas em cada uma das aletas do RF de aço inoxidável.

Foi possível simular a deflexão sofrida pelo RF de aço inoxidável, mostrado na Figura 9, um comparativo entre o RF real e o simulado.

CONCLUSÃO

A aplicação do FMEA mostrou sua eficácia na identificação dos efeitos negativos de potenciais falhas que possam ocorrer em um equipamento. Por ser um documento vivo, o FMEA deve ser revisado e preenchido periodicamente. Além disso, deve ser atualizado, isto é, novos índices de severidade, ocorrência e detecção, devem ser gerados levando em conta um novo cenário.

A análise de elementos finitos feita por meio do programa computacional CAD mostrou sua eficiência na identificação das concentrações de tensões no rotor fluidificante. Os locais onde ocorreram a quebra do rotor fluidificante foram, de fato, identificados por meio das simulações realizadas no CAD. Além disso, foi possível identificar uma possível falha de projeto ao constatar que o tamanho do diâmetro, onde o RF é acoplado, está fora do ideal para aplicação atual, devendo então passar por um redimensionamento. Ainda, a quebra do eixo ocorre onde a torção de cisalhamento é máxima, fato que também foi constatado por meio da simulação feita usando-se software.

A utilização da ferramenta FMEA foi essencial para melhor entendimento de como as falhas acontecem nos componentes, em especial o eixo e RF, de onde elas são oriundas e os efeitos que elas causam no misturador de reagentes químicos. Melhor percepção de como o FMEA ajuda na prevenção de falhas pôde ser aprendida neste trabalho, uma vez que cada uma de suas causas potenciais foram estudadas separadamente, dando um foco especial para cada uma delas.

O FMEA mostrou-se uma ferramenta essencial para a estratégia de manutenção preventiva, caracterizada pelo trabalho sistemático, evitando a ocorrência de falhas e procurando a sua prevenção, mantendo, assim, um controle contínuo sobre o equipamento. ■

REFERÊNCIAS

- BORROR, Connie M. *The Certified Quality Engineer*. 3th ed. ASQ: Quality Press, 2008.
- KARDEC, A.; NASCIE, J. *Manutenção: Função Estratégica*. 3 ed. Rio de Janeiro: Quality Mark, 2001.
- KARDEC, A.; NASCIE, J.; BARONI, T. *Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas*. Rio de Janeiro: Qualitymark/ABRAMAN, 2002.
- NORTON, R. L. *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada*. Tradução por Konstantinos Dimitriou Stavropoulos, et al. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- STAMATIS, D. H. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQC Quality Press, 2005.
- TAVARES, L. *Administração Moderna de Manutenção*. Novo Polo Editora – Nova York, 1998.