

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE PARA A REDUÇÃO DO ÍNDICE DE REFUGO EM UM PROCESSO DE CALANDRAGEM

Alice Castilhos Silva (UFRGS)

alicecastilhos@gmail.com

Michel José Anzanello (UFRGS)

anzanello@producao.ufrgs.br

Resumo

Este trabalho utiliza ferramentas clássicas de confiabilidade em uma empresa multinacional do setor da borracha, visando reduzir a frequência de falhas dos equipamentos e minimizar o índice de refugo do sistema analisado. Para isso, a seguinte metodologia foi adotada: (i) identificar o sistema a ser estudado, com base no histórico de dados de falhas disponibilizado pela empresa; (ii) coletar e realizar o tratamento dos dados de tempos até falha; (iii) identificar os modos de falhas preponderantes do equipamento através da técnica FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*); (iv) modelagem das principais medidas de confiabilidade, tais como *Mean Time to Failure* (MTTF), função de risco e de confiabilidade; (v) comparar os dados obtidos com as principais distribuições de probabilidade empregues em estudos de manutenção. A principal contribuição deste trabalho é a proposição de um intervalo de manutenções preventivas e a elaboração da FMEA do equipamento que norteie ações de melhoria.

Palavras-chave: Setor da borracha, confiabilidade, *FMEA*, manutenção.

Abstract

This work applies classical reliability techniques in a multinational industry of the rubber sector to reduce the frequency of equipment failures and to minimize the rate of waste of the analyzed system. For that matter, we proposed the following steps: (i) identify the system, based on historical data of failures provided by the company; (ii) collect and process the failure data; (iii) identify preponderant failure modes of the analyzed equipment through the FMEA technique, (iv) estimate the main measures of reliability, such as Mean Time to failure (MTTF), hazard function and reliability function, and (v) compare results with the main probability distributions used in maintenance studies. The main contribution of this work is the proposition of interval for preventive maintenance and the elaboration of FMEA for future improvement measures.

Keys-word: Rubber sector, reliability, *FMEA*, maintenance.

1. Introdução

O crescente nível de exigência do mercado consumidor e a alta diversificação de produtos oferecidos ao mesmo demandam um sistema que garanta o atendimento das necessidades dos clientes, assegurando a qualidade desejada do produto final. Segundo Campos (1992), um produto ou serviço de qualidade é aquele que atende, de forma confiável, acessível, segura e no tempo certo, às necessidades do cliente.

Dentro deste contexto, as empresas têm como objetivo a otimização de seus processos produtivos, o controle e a redução de custos da produção, a produção de produtos confiáveis e seguros e a garantia da qualidade dos mesmos. Conforme Fogliatto e Ribeiro (2009), a qualidade está inter-relacionada com a confiabilidade dos processos e produtos. De acordo com Leemis (1995), confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar satisfatoriamente sua função requerida, sob condições especificadas em um período de tempo predeterminado. A confiabilidade dos processos produtivos nas empresas manufatureiras está fortemente relacionada à redução na probabilidade de falhas do sistema, pois garante o melhor desempenho dos seus produtos. Nesse sentido, as empresas focam-se no desenvolvimento de sistemas produtivos confiáveis, visando minimizar a probabilidade de falhas dos mesmos, garantindo patamares desejados e mantendo sua competitividade no mercado.

A empresa em estudo está presente no Brasil há mais de 80 anos, fazendo parte do setor da borracha e tendo como foco produtos com elevado nível tecnológico e alto desempenho. Devido ao grau de comprometimento com a qualidade de seus produtos, faz-se necessário uma rígida análise da confiabilidade de seus processos. O processo de calandragem, parte do processo de obtenção de lonas, tem apresentado elevados índices de refugo, comprometendo a qualidade do produto e aumentando os custos de não-qualidade do componente. De tal forma, percebe-se a aplicação de ferramentas de confiabilidade na máquina em questão como uma oportunidade de melhoria do processo.

Este artigo aplica a ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) para a identificação dos modos de falha preponderantes da máquina COM. Esta máquina realiza um processo de calandragem, que consiste em passar um composto de borracha entre dois ou mais cilindros metálicos que giram em sentidos opostos formando lâminas (folhetas) de borracha; após este processo, a máquina aplica a folheta no tecido emborrachado, obtendo como produto final as lonas. O objetivo da análise está na identificação dos modos preponderantes de falha do processo e na proposição de

melhorias com vistas à redução do índice de refugo da máquina em questão. Além da priorização dos modos de falha e análise de suas causas e consequências, pretende-se realizar a modelagem de dados de falha da máquina através de um *software* de Confiabilidade e definir um cronograma de manutenção adequado para a máquina COM.

Este artigo está estruturado como segue, além desta introdução. A segunda seção apresenta a fundamentação teórica das ferramentas de confiabilidade abordadas no estudo. Na terceira seção é apresentado o método de análise de confiabilidade, enquanto que a quarta seção descreve os resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta. As considerações finais são encontradas na quinta seção.

2. Referencial Teórico

Esta seção apresenta os fundamentos sobre a teoria da confiabilidade, mais especificamente sobre as principais distribuições e medidas para análise de confiabilidade. Em seguida, realiza-se uma explanação sobre os fundamentos da FMEA. Por fim, são apresentados conceitos básicos acerca de manutenção.

2.1. Confiabilidade

O termo Confiabilidade começou a ser utilizado na década de 50, nos Estados Unidos, durante as análises de falha de equipamentos militares (PINTO; XAVIER, 2001). Nesse período, percebeu-se a necessidade de melhorar a coleta de dados de falha, desenvolver componentes mais confiáveis, realizar testes no projeto do produto e estabelecer padrões e requisitos quantitativos de confiabilidade a serem seguidos (GUZZON, 2009). Na década de 60, começam a surgir publicações demonstrando os fundamentos da análise de confiabilidade; na década de 70 surgem os primeiros modelos de análise de confiabilidade; finalmente, na década de 80, inicia-se a implantação definitiva das técnicas de análise da confiabilidade (LAFRAIA, 2006).

Elsayed (1996) define confiabilidade como a probabilidade de um produto ou serviço exercer sua função sem falhas, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas no projeto. A confiabilidade é um elemento chave para o sucesso dos ativos no setor comercial, industrial e para o meio ambiente (DIAS, 1996). Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), um sistema confiável é aquele que requer menos intervenções, gera menores custos, apresenta processos mais robustos e estáveis.

Na definição de confiabilidade, quatro estruturas fundamentais devem ser consideradas: a probabilidade, o comportamento adequado, o período de uso (ou de

vida) e as condições de uso (DIAS, 2005). A probabilidade fornece a entrada numérica inicial para a avaliação da confiabilidade. O comportamento adequado está associado à existência de um padrão pré-definido. O período de uso deve ser analisado a partir da premissa básica de que a falha ocorrerá. As condições de uso, por sua vez, referem-se à adequação do ambiente de uso relativo às variáveis do projeto.

2.2. Distribuições de probabilidade, medidas de confiabilidade e a ferramenta FMEA

A análise de confiabilidade apóia-se na modelagem da probabilidade de um sistema executar as funções requeridas, sob condições especificadas, em um intervalo de tempo, sem falhar. Em seguida, tais distribuições e medidas são brevemente apresentadas. Por fim, a ferramenta FMEA é introduzida.

2.2.1 Medidas de Confiabilidade

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), as principais medidas de probabilidade utilizadas em estudos de confiabilidade são as funções (i) acumulada de falhas; (ii) densidade de falhas; (iii) confiabilidade; (iv) risco ou taxa de falha; (v) Tempo Médio até Falha (*Mean Time to Failure - MTTF*); (vi) Tempo Médio entre Falhas (*Mean Time Between Failures - MTBF*); e (vii) Tempo Médio de Reparação (*Mean Time to Repair - MTTR*), as quais são descritas na sequência.

Função de Densidade de Falhas: é a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo, na equação (1).

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

Função Acumulada de Falhas: é a probabilidade de falha de uma unidade em um período de tempo. Pode ser representada pela equação (2), onde T é uma variável aleatória que representa o momento de falha e f(u) é a função densidade de probabilidade da distribuição que descrever a ocorrência da falha.

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad (2)$$

Função de Confiabilidade: é a probabilidade de que um item sobreviva a um dado intervalo estabelecido, na equação (3).

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{+\infty} f(u) du \quad (3)$$

Função de Risco ou Taxa de Falhas: é a probabilidade de falha no intervalo de t a t+dt, dado que não houve falha em t, taxa instantânea de falha, na equação (4).

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

Tempo Médio até Falha (*Mean Time to Failure – MTTF*): é o tempo médio para falha de componentes que não podem ser reparados, apresentado na equação (5). É aplicável a componentes cuja vida termina na primeira falha.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (5)$$

Tempo Médio entre Falhas (*Mean Time Between Failures – MTBF*): é o tempo médio para falha de componentes reparáveis, conforme a equação (6).

$$MTBF = \frac{1}{h(t)} \quad (6)$$

Tempo Médio de Reparação (*Mean Time to Repair – MTTR*): é o tempo médio para o reparo de componentes, obtido de uma amostra nas mesmas condições de uso do componente desejado [equação (7)].

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^N TPR_i}{N} \quad (7)$$

2.2.2 Distribuições de Probabilidade Associadas à Confiabilidade

Conforme Crowe e Feinberg (2001), as principais distribuições associadas à confiabilidade são as distribuições: (i) Normal; (ii) Exponencial; (iii) Weibull; (iv) Gama; e (v) Lognormal, abaixo descritas.

Distribuição Normal: é uma distribuição com variações simetricamente distribuídas ao redor de sua média. É definida como a equação (8), onde μ é o parâmetro de localização e σ é o parâmetro de forma.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(t-\mu)^2} \quad (8)$$

Distribuição Exponencial: é importante em estudos de confiabilidade por ser a única distribuição contínua com função de risco constante, sendo descrita na equação (9).

$$f(t) = \lambda \exp^{-\lambda t} \quad (9)$$

Distribuição Weibull: é apropriada na modelagem de tempos até falha apresentando funções de risco constante, estritamente crescente e estritamente decrescente. É uma das

mais importantes distribuições na modelagem devido a sua flexibilidade e capacidade de representação de amostras de tempo até falha com comportamentos distintos. É apresentada na equação (10), onde γ é o parâmetro de forma e θ é o parâmetro de escala.

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^\gamma/\theta} \quad (10)$$

Distribuição Gama: é a generalização da distribuição exponencial.

Distribuição Lognormal: é uma distribuição limitada à esquerda, muito utilizada na modelagem de tempos até reparo em unidades reparáveis [equação (11)]. O parâmetro μ é a média dos tempos de falha e σ o desvio dos mesmos.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(\ln t - \mu)}{\sigma} \right]^2} \quad (11)$$

2.2.3 FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*)

A FMEA é uma ferramenta que quantifica os efeitos das possíveis falhas de um componente de um sistema, permitindo, assim, a priorização das ações de melhoria acerca os modos de falha mais críticos. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009) e Amaral e Toledo (2006), a FMEA é uma técnica de confiabilidade documentada pelo preenchimento de uma tabela padrão, objetivando reconhecer e avaliar possíveis falhas que um processo pode sofrer e elaborar ações que possam eliminar ou minimizar a ocorrência dessas falhas, aumentando a confiabilidade do processo.

A FMEA avalia a severidade de cada falha relativamente ao impacto que pode causar, suas probabilidades de ocorrência e de detecção antes de chegarem às mãos dos clientes (FERNANDES, 2006). Com base nestes três elementos, representados através dos índices de severidade, ocorrência e detecção, calcula-se o índice de risco, a fim de priorizar as ações de correção e melhoria do processo.

Para o desenvolvimento da FMEA, o profissional responsável pelo estudo deve reunir a equipe de trabalho, a qual deve listar características que o processo deve atender. A partir dessa lista, são identificados os potenciais modos de falha e as possíveis ações corretivas. A análise da FMEA é muito mais do que o mero preenchimento de uma tabela; o maior valor está na discussão e reflexão do grupo. Os campos que devem ser preenchidos são definidos como segue.

Cabeçalho: contém a numeração da FMEA, o departamento responsável pelo estudo, os dados da equipe e do coordenador do estudo, a data do documento e o local onde se está realizando o estudo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Item/Função: é a etapa do processo ou descrição sucinta da operação em análise (ALVES; COSTA, 2004).

Modos Potenciais de Falha: definição da forma com que o processo pode falhar, diminuindo parcial ou totalmente seu desempenho (ANDERY, P. R. P.; HELMAN, H., 1995).

Efeitos Potenciais de Falha: possíveis impactos que os modos potenciais de falha podem causar ao sistema e/ou aos clientes. Neste campo, descreve-se como os clientes e/ou sistema podem sofrer caso o modo potencial de falha não seja prevenido ou corrigido (SIQUEIRA, 2005).

Severidade (S): neste item, é feita uma análise quantitativa da severidade de acordo com o impacto que o efeito potencial de falha pode causar aos clientes e/ou ao sistema (HECHT, 2004). O critério sugerido por Hecht (2004) é apresentado no Quadro 1.

SEVERIDADE	DESCRIÇÃO	ESCALA
Catastrófico	Compromete a segurança da operação ou envolve infração a regulamentos governamentais.	10
Crítico	Provoca alta insatisfação do cliente, grave.	8
Marginal	Provoca insatisfação, devido à queda do desempenho ou mau funcionamento do produto.	6
Mínimo	Provoca insatisfação, o cliente observa apenas uma leve deterioração ou queda no desempenho.	4
Insignificante	Algum desvio que praticamente não afeta o desempenho do produto, e poucos clientes percebem a falha.	2

Quadro 1: Escala de Severidade.
Adaptado de HEBERT HECHT (2004).

Classificação: relaciona as características dos itens em criticidades quanto à qualidade e segurança (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Causas/Mecanismos Potenciais de Falha: preenchido com as possíveis causas da ocorrência da falha (DORNELES; MATSCHULAT; RODRIGUES, 2010).

Ocorrência (O): probabilidade com que um modo de falha pode ocorrer, ou seja, é a frequência com que se pode esperar que ocorra a causa da falha (JUNIOR; SANT`ANNA, 2010). Geralmente, esta probabilidade é baseada em dados estatísticos, relatórios e dados históricos. O Quadro 2 sugere, de acordo com Lafraia (2006), uma escala para a avaliação da ocorrência em processos.

POSSIBILIDADE DE FALHA	RANKING	TAXA DE FALHAS
Remota: impossível ocorrer a falha.	1	< 1 em 10 ⁶
Baixa: poucas falhas.	2	1 em 20.000
	3	1 em 40.000
Moderada: falhas ocasionais	4	1 em 1.000
	5	1 em 400
	6	1 em 80
Alta: falhas repetitivas	7	1 em 40
	8	1 em 20
Muito Alta: falhas quase que inevitáveis.	9	1 em 8
	10	1 em 2

Quadro 2: Escala de Avaliação da Ocorrência.
Fonte: LAFRAIA, 2006.

Controles de Prevenção e Detecção: são os controles planejados ou já aplicados em projetos similares (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Detecção (D): é uma estimativa da eficácia dos controles existentes em detectar as causas ou os modos de falha antes da próxima operação (DORNELES; MATSCHULAT; RODRIGUES, 2010). Pode-se utilizar o critério proposto por Andery e Helman (1991), conforme o Quadro 3.

POSSIBILIDADE DE DETECÇÃO	DESCRIÇÃO	ESCALA
Muito remota	Os controles existentes não irão detectar a falha, ou não existem.	10
Remota	Os controles existentes provavelmente não irão detectar a falha, ou não existem.	9
Baixa	Baixa probabilidade de os controles detectarem essa falha.	8
		7
Moderada	Os controles podem detectar a falha.	6
		5
		4
Alta	Alta probabilidade de os controles detectarem essa falha.	3
		2
Muita Alta	Praticamente, certo que os controles irão detectar essa falha.	1

Quadro 3: Escala de Detecção dos Controles.
Fonte: ANDERY; HELMAN, 1991.

Risco (R): multiplicação da severidade, ocorrência e detecção ($R = S \times O \times D$) (MATOS; MILAN, 2009).

Ações Recomendadas: ações que devem ser realizadas para prevenir ou corrigir um modo potencial de falha (ALVES; COSTA, 2004).

Responsável e Data (para a ação): neste campo é referenciado o responsável por realizar a ação recomendada e o prazo para finalização da mesma (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Ações Efetuadas: ações que foram efetivamente realizadas (ANDERY, P. R. P.; HELMAN, H., 1995).

Risco Resultante (R): é o risco remanescente após a implementação da melhoria (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

As distribuições e medidas de confiabilidade acima descritas, bem como a FMEA, cumprem importante papel no planejamento e operacionalização da manutenção industrial, abaixo descrita.

2.3 Manutenção

A manutenção teve seu desenvolvimento durante e após a Segunda Guerra Mundial através das constatações de perdas de equipamentos e vidas por conta de falhas de materiais (ARAÚJO et al., 2002). Segundo Filho (2000), a manutenção é uma função empresarial que tem como objetivo controlar, reparar e revisar os equipamentos industriais, a fim de garantir seu devido funcionamento.

Pinto e Xavier (2001) colocam que a manutenção deve garantir a disponibilidade dos equipamentos e instalações, de modo que atenda o processo e a preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custo adequados. As definições mais recentes possuem uma visão da Manutenção como preservação do estado funcional e não somente preservação do instrumento, deixando o conceito clássico de conservação pura e simples do ativo (ALVES; FALSARELLA, 2009).

A manutenção pode ser dividida em preventiva, corretiva não planejada, corretiva planejada, preditiva, detectiva e engenharia de manutenção (PINTO; XAVIER, 2001). A manutenção preventiva visa evitar a falha antes que a quebra efetivamente aconteça. Para Pinto e Xavier (2001), essa manutenção deve seguir um cronograma, previamente planejado em intervalos de tempo. A manutenção corretiva não planejada é aquela realizada de forma aleatória, após ocorrer uma falha. A manutenção corretiva planejada é a correção realizada através de uma decisão gerencial, ou seja, pela atuação em função de acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até a quebra. A manutenção preditiva é realizada com base em modificação de parâmetros, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática (MIRSHAWKA, 1991). De acordo com Machado e Otani (2008), a manutenção detectiva é efetuada em sistemas de proteção, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção. A engenharia de manutenção é o conjunto de atividades que permite o aumento da confiabilidade e a garantia da disponibilidade (XAVIER, 2005). Por fim,

Sellitto (2005) ressalta que a manutenção preventiva traz bons resultados com baixo esforço, enquanto que as ações corretivas exigem alto esforço.

A manutenção deixou de ser uma geradora de custos nas empresas e passou a ser fator diferencial, pois o custo da falha congrega o custo das peças e da mão-de-obra necessárias ao reparo e o custo da indisponibilidade do equipamento. Marcorin e Lima (2003) argumentam que a manutenção deve ser encarada como uma estratégia, devendo ser vista como investimento e não como gasto adicional.

A aplicação de estratégias de manutenção é abundantemente apresentada na literatura. Arruda et al. (2009) mostram que, aplicando as distribuições de probabilidade combinadas com a FMEA, pode-se determinar a parte do sistema onde ocorrem mais falhas, bem como seus intervalos de ocorrência e o tipo de manutenção que deve ser aplicado ao sistema. Mota (2003) e Smith (1993) sugerem uma sistemática para definição do intervalo de manutenção e dimensionamento do escopo das paradas de manutenção. Fleming et al. (1999), por sua vez, encontraram dificuldades em análises de confiabilidade devido à ausência de coletas regulares de dados de falhas, evidenciando a importância desta etapa em um estudo de confiabilidade.

Barros e Lima (2011) apresentaram um modelo que demonstra a influência da manutenção sob o ponto de vista da engenharia de confiabilidade. Apesar dos resultados obtidos não permitirem uma avaliação exata da sua eficácia, os autores concluíram que a função manutenção influencia o percentual de tempo que os itens estão disponíveis. Fleming et al. (1999) conseguiram, através da proposição de um plano diferenciado de manutenção, contribuir para a diminuição de intervenções não-programadas, melhorando a qualidade do produto e aumentando a disponibilidade dos ativos, reduzindo o custo de manutenção em 23% e diminuindo a indisponibilidade operacional em 23,56%.

3. Procedimentos Metodológicos

O método adotado nesse trabalho apresenta-se como uma pesquisa aplicada, com uma abordagem tanto qualitativa quanto quantitativa. A pesquisa aplicada se caracteriza por seu interesse prático, isto é, os resultados devem efetivamente ser utilizados na solução de problemas. Tendo em vista que este artigo visa reduzir o índice de refugo da máquina estudada através da elaboração de uma FMEA e determinação de intervalo de manutenção para a máquina, a pesquisa caracteriza-se como aplicada.

De acordo com o objetivo geral, essa pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa descritiva, que utiliza a técnica do estudo de caso como ferramenta de

coleta e análise de dados. O procedimento metodológico idealizado segue os passos representados na Figura 1, os quais são detalhados na sequência.

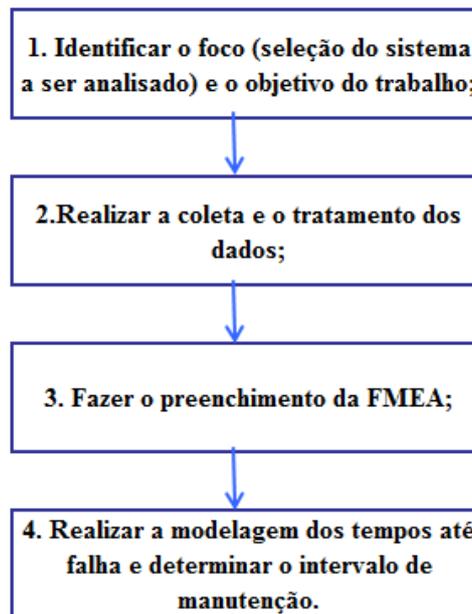


Figura 1: Etapas do método proposto.

Passo 1: Identificação do sistema a ser analisado

No passo 1 foi identificado o sistema a ser analisado. Priorizaram-se os processos de acordo com a sua incidência de falhas, refugos e retrabalhos, valendo-se de registros de falhas e históricos operacionais.

Passo 2: Coleta e tratamento dos dados de falha

No segundo passo realizou-se a coleta dos dados de tempo até falha. Os dados foram coletados a partir dos pedidos de serviço de manutenção corretiva, registrados no sistema da empresa. Os tempos até falha foram matematicamente manipulados, visto que o sistema traz os registros no formato de data de ocorrência da falha, e a análise demanda dados no formato de intervalo de tempo transcorrido até a ocorrência de falhas. Com o auxílio de especialistas, analisaram-se, ainda, aspectos de severidade, detecção e ocorrência das falhas.

De acordo com Elsayed (1996), o estudo deve considerar apenas os tipos de falha que são reincidentes 20 ou mais vezes (quantidade que assegura significância à modelagem). O tratamento dos dados foi finalizado com a remoção de possíveis dados espúrios que podem distorcer a modelagem.

Passo 3: Preenchimento da FMEA

O terceiro passo consistiu em preencher a FMEA de acordo com a seção 2.2.3., utilizando os dados dos passos 1 e 2. Nesta etapa foram selecionados os

especialistas, escolhidos de acordo com o seu envolvimento e “*know how*” em relação ao problema e processo.

Depois de preenchida a FMEA, foi calculado o NPR (índice global de risco), com o intuito de priorizar os mecanismos potenciais de falha. Na sequência, foram realizadas as proposições de melhorias de acordo com os modos de falha priorizados. Por fim, novos ciclos de FMEA são recomendados, a fim de atacar novos modos de falha preponderantes.

Passo 4: Modelagem dos tempos até falha e determinação do intervalo de manutenção

Nesta etapa foi realizada a modelagem dos tempos até falha, a qual foi feita através de um *software* estatístico para análise de confiabilidade. Os dados obtidos no passo 2 foram ajustados a distribuições de probabilidade, sendo tal ajuste balizado pela análise de testes estatísticos e papel de probabilidade. Identificada a melhor distribuição, foi gerado o gráfico da função de confiabilidade ($R(t)$), exemplificado na Figura 2, e calculados os valores de MTTF (*Mean Time to Failure*) e MTBF (*Mean Time Between Failures*), que contribuem para a determinação do intervalo de manutenção.

A estimação do intervalo de manutenção parte da definição do patamar de confiabilidade mínimo do sistema, definido pelos responsáveis do processo em análise. Normalmente, utiliza-se o valor de $R(t)$ entre 0,80 e 0,90 em aplicações industriais (ELSAYED, 1996). Em um exemplo hipotético, a Figura 2 mostra que, com o limite de confiabilidade 0,9, o intervalo de manutenção deve ser de 250 horas. Esse procedimento supõe que a manutenção no equipamento assegura sua operação em níveis muito próximos à condição de novo.

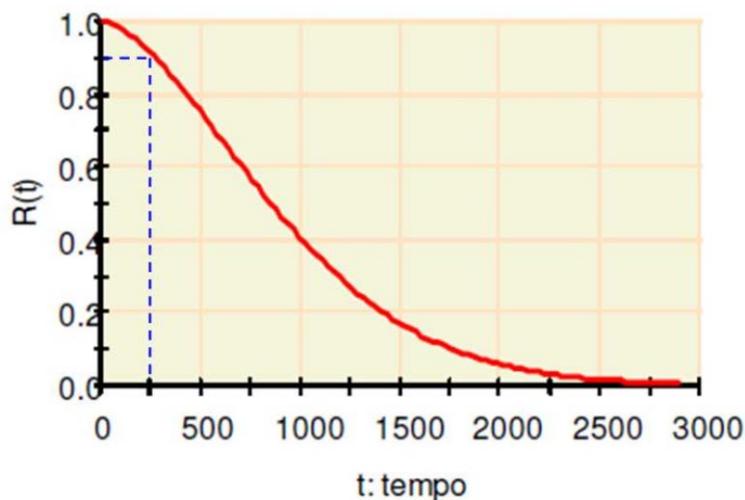


Figura 2: Função Confiabilidade $R(t)$.

4. Resultados

A empresa possui um sistema de coleta de refugo on-line, no qual os operadores ou inspetores declaram os refugos gerados durante sua jornada de trabalho. Através deste sistema o responsável pelas análises de refugo pode consultar qualquer informação associada à produção de refugo. Essas análises são realizadas periodicamente, visto que uma elevação no nível de refugo aponta inconsistências na qualidade dos produtos gerados. A partir dos dados coletados no sistema, verificou-se a necessidade de realizar uma análise de confiabilidade e elaborar um FMEA, com vistas a reduzir problemas qualitativos no produto.

4.1. Identificação do sistema a ser analisado

A realização deste trabalho partiu do número de reclamações a respeito do grande volume de refugo de lona nos processos subsequentes a sua produção. Realizou-se então uma análise da contribuição de cada máquina nos níveis de refugo do processo de produção de lona, conforme apresentado na Figura 3.

O processo de fabricação das lonas é dividido em: emborrachamento do tecido tratado (CAL), folhetagem do tecido emborrachado (COM) e corte da lona (CUT). A lona é direcionada para a confecção, após ser cortada. O defeito de tecido pode ser gerado em qualquer uma das máquinas apresentadas acima.

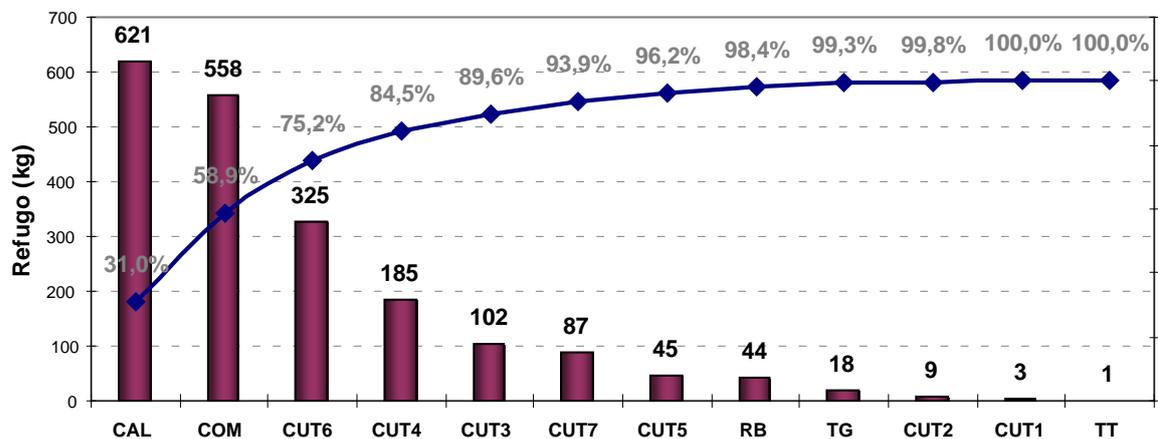


Figura 3: Refugo de tecido por máquina.

Conforme a Figura 3, a máquina CAL apresentou maior quantidade de refugo por material não conforme, porém a empresa já está atuando intensamente neste ativo. Portanto, foi escolhida a máquina COM para a realização do estudo, responsável pela segunda maior quantidade de refugo.

A Calandra COM é composta por cinco sub-conjuntos, conforme a Figura 4, e apresenta as seguintes funcionalidades: alimentação (onde o operador abastece a

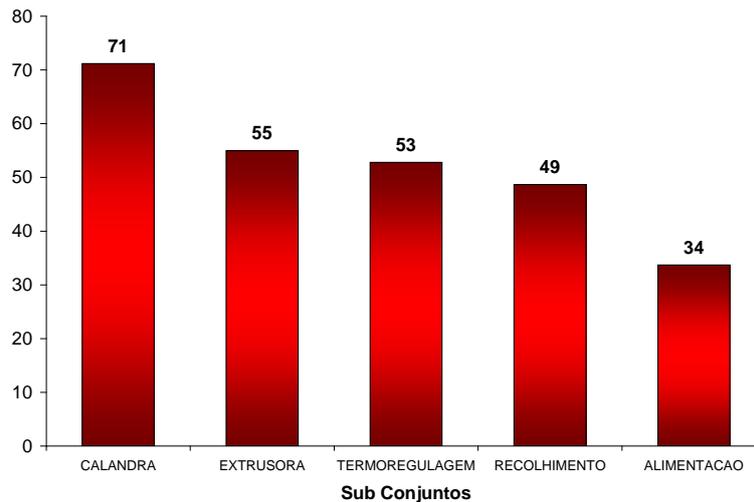


Figura 5: Tempo médio de reparo por sub-conjunto.

Partindo do sub-conjunto Calandra, foi realizado o estudo dos tempos médios de reparo de suas especialidades de falhas em um banco contendo 347 intervenções corretivas. As falhas foram classificadas em Elétrica, Mecânica e Eletrônica, de acordo com seu modo gerador e, como pode-se observar na Figura 6, a especialidade Eletrônica foi a que apresentou maior tempo médio de reparo (150 minutos). De tal forma, a análise subsequente focou-se nas falhas Eletrônicas.

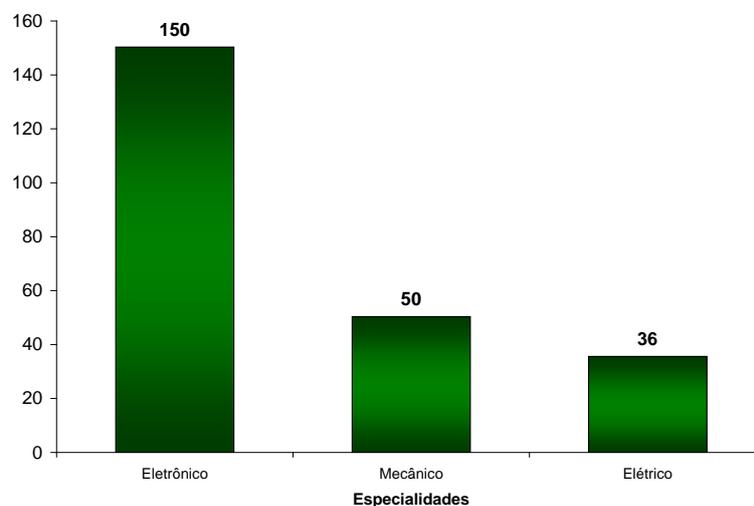


Figura 6: Tempo médio de reparo por especialidade da manutenção.

Por fim, com um banco de dados de 81 intervenções corretivas, foi realizada a análise do tempo médio de reparo dos elementos os quais compõe o sub-conjunto Calandra e possuem falhas eletrônicas.

De acordo com a Figura 7, o componente centrador apresentou maior tempo médio de reparo (124 minutos). Analisando a quantidade de dados de falhas significativas do centrador, observaram-se 28 intervenções corretivas neste componente.

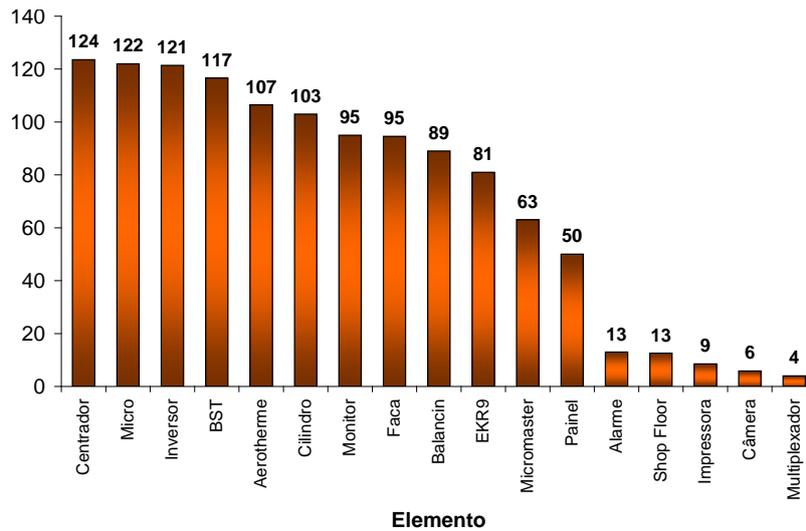


Figura 7: Tempo médio de reparo por componente.

Neste passo foram, ainda, calculados os tempos até falhas, já que o sistema apresenta apenas as datas e hora das ocorrências. Este cálculo foi importante para modelagem dos dados realizada na etapa 4.

4.3. Preenchimento da FMEA

Nesta etapa, foi realizado o preenchimento da FMEA focada no componente selecionado na etapa anterior. Primeiramente, foram identificados os especialistas responsáveis pelo preenchimento. Os especialistas foram escolhidos de acordo com seu envolvimento e conhecimento do processo.

A equipe multifuncional gerada era composta por dois especialistas de qualidade, um inspetor de qualidade, um especialista de manutenção, um manutentor e um operador da máquina. Foram feitas reuniões com toda a equipe, onde se levantou todos os possíveis modos de falha do centrador.

Depois, discutiram-se sobre todos os itens apontados e, então, definiram-se os potenciais modos de falha, efeitos potenciais da falha, causas potenciais de falha, índices de severidade, ocorrência, e detecção e os controles do processo. A classificação dos modos de falha foi estabelecida de acordo com a norma da empresa que rege a elaboração de FMEA (CC – crítica, M – alto impacto no processo e N - standard). Os resultados do primeiro ciclo da FMEA são apresentados na Tabela 1.

Durante a aplicação da ferramenta, a equipe observou algumas dificuldades e resistências. Percebeu-se que existiam divergências entre os participantes do grupo. Além disso, muitas reuniões demandaram considerável tempo para que um consenso fosse atingido acerca de valores de severidade, ocorrência e detecção, pois cada participante tem seus conceitos de importância, até por serem de áreas diferentes.

FORMULÁRIO DE FMEA - ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHA

Identificação: (x) Processo () Produto		Linha: Moto/Scooter		Versão: 01		Data FMEA:													
Processo: Calandragem		Equipe:		Coordenador:		10/05/2012													
Equipamento: Centrador																			
Item / Função	Modo de falha potencial	Efeito(s) potencial(is) da falha	S e l e c t i v e z	C l a s s	Causa(s) / Mecanismo(s) potencial(is) da falha	O c o r r	Controles atuais do processo		D e t e c t	N P R	Ações recomendadas	Responsável / prazo	Ações tomadas	S e l e c t i v e z	O c o r r	D e t e c t	N P R		
							Prevenção	Deteção											
CENTRADOR / CENTRAGEM DE MATERIAL	Centrador Irregular	Descentragem do material, dimensões irregulares e refugo no processo posterior.	6	M	Defeito nas placas e/ou sensores	3	Controle de preventiva	Controle Amperagem da Placa	5	90								0	
			6	M	Desarme do centrador	6	Controle de MPM	Controle Amperagem da Placa	5	180	Alterar frequência de inspeção no check list do MPM de mensal para quinzenal.	Especialista de Qualidade - 14/05						0	
	Leitura Irregular	Desvio na leitura do centrador	3	N	Sujeira nas lentes do centrador	6	Controle de MPM	Inspeção Visual	5	90									
	Alimentação Irregular	Oscilação dimensional, refugo no processo posterior, produto acabado defeituoso.	6	M	Largura do material utilizado fora do especificado	3	Check-troca	Controle Visual	5	90									0
			6	M	Variações dimensionais dos elementos, defeituoso produto acabado.	6	M	6	2	Check-troca	Acompanhamento da escala durante o processo	5	60						
	Ajuste de set up irregular	Variações dimensionais dos elementos, defeituoso produto acabado.	6	M	6	M	2	Check-troca	Acompanhamento da escala durante o processo	5	60								0
			6	M	6	M	2	Check-troca	Acompanhamento da escala durante o processo	5	60								0
	Rolamento Irregular	Variações dimensionais dos elementos e refugo no processo posterior	6	M	Falta de lubrificação dos roletes do centrador	3	Controle de MPM	Controle Visual	5	90									0
			6	M	Desuniformidade dimensional do material, refugo no processo posterior e produto acabado defeituoso.	6	M	2	Controle de MPM	Controle Visual	5	60							
	Contaminação da lona durante a passagem pelos roletes do centrador	Produto acabado defeituoso, bolhas, corpo estranho e refugo no processo posterior	9	CC	Roletes do centrador com graxa, óleo, água	1	5'S na área de trabalho e check list	Controle Visual, inspeção visual	5	45									0
Posicionamento curso central do centrador com ângulo irregular	Centragem do material apenas em uma escala	6	M	Não posicionamento do curso central do centrador	6	Check-list	Controle Visual	5	180	Reciclagem e treinamento operacional / Automatizar posicionamento	Especialista de Qualidade - 15/07 / Especialista de Manutenção							0	

Tabela 1: 1º Ciclo da FMEA.

Com todos os critérios preenchidos, calculou-se o NPR para cada potencial causa de falha, como pode ser observado na Tabela 1. O critério utilizado para desenvolver as ações recomendadas foi estabelecido de acordo com a norma da empresa, a qual demanda obrigatoriedade de ação para NPR maior ou igual a 100.

Na FMEA foram encontrados dois resultados de NPR superior a 100. Para o modo de falha “Centrador irregular” com a causa potencial “Desarme do centrador” existe um documento de controle oficial da empresa, porém a frequência de inspeção exigida pelo documento é mensal, o que não é suficiente para controlar o desacionamento do centrador. A ação sugerida consiste em estabelecer revisão quinzenal.

Por ser de fácil implementação, a ação de melhoria acima possibilitou a aplicação de uma segunda rodada da FMEA, visto que esta ação faz com que o índice de ocorrência da causa em questão reduza-se para 3 (de 6). A verificação mais frequente

possibilita a prevenção desta causa em um menor período de tempo, gerando um novo NPR = 90, conforme a Tabela 2.

Para o modo de falha “Posicionamento curso central do centrador com ângulo Irregular”, com potencial causa de falha “Não posicionamento do curso central do centrador”, foi estabelecida a ação de treinar e reciclar os operadores (já que esta tarefa depende unicamente dos operadores). Como existem quatro equipes na máquina com sistema de revezamento e folgas, esta ação levará tempo adicional para ser efetivamente implementada. A realização do treinamento operacional propõe que a ocorrência desta falha seja minimizada.

As ações determinadas para a melhoria no processo sugerem uma redução do índice de refugo da máquina. Uma vez realizadas as melhorias, as ocorrências de falha do componente potencialmente diminuem, influenciando diretamente no funcionamento do equipamento, prevenindo quebras e garantindo que o material esteja sendo centrado de forma correta.

FORMULÁRIO DE FMEA - ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHA																		
Identificação: (x) Processo () Produto			Linha: Moto/Scooter				Versão: 02		Data FMEA:									
Processo: Calandragem			Equipe:				Coordenador:		21/05/2012									
Equipamento: Centrador																		
Item / Função	Modo de falha potencial	Efeito(s) potencial(is) da falha	S e v e r	C l a s s	Causa(s) / Mecanismo(s) potencial(is) da falha	O c o r r	Controles atuais do processo		D e t e c	N P R	Ações recomendadas	Responsável / prazo	Ações tomadas	S e v e r	O c o r r	D e t e c	N P R	
							Prevenção	Deteção										
CENTRADOR / CENTRAGEM DE MATERIAL	Centrador Irregular	Descentragem do material, dimensões irregulares e refugo no processo posterior.	6	M	Defeito nas placas e/ou sensores	3	Controle de preventiva	Controle Amperagem da Placa	5	90								0
			6	M	Desarme do centrador	6	Controle de MPM	Controle Amperagem da Placa	5	180	Alterar frequência de inspeção no check list do MPM de mensal para quinzenal.	Especialista de Qualidade - 14/05	Alterada frequência de inspeção no MPM.	6	3	5	90	
	Leitura Irregular	Desvio na leitura do centrador	3	N	Sujeira nas lentes do centrador	6	Controle de MPM	Inspeção Visual	5	90								
	Alimentação Irregular	Oscilação dimensional, refugo no processo posterior, produto acabado defeituoso.	6	M	Largura do material utilizado fora do especificado	3	Check-troca	Controle Visual	5	90								0
	Ajuste de set up irregular	Variações dimensionais dos elementos, defeituoso produto acabado.	6	M	Digitação errada da velocidade de linha	2	Check-troca	Acompanhamento da escala durante o processo	5	60								0
			6	M	Digitação errada da escala do material	2	Check-troca	Acompanhamento da escala durante o processo	5	60								0
	Rolamento Irregular	Variações dimensionais dos elementos e refugo no processo posterior.	6	M	Falta de lubrificação dos roletes do centrador	3	Controle de MPM	Controle Visual	5	90								0
			6	M	Amassamentos superficiais dos roletes do centrador	2	Controle de MPM	Controle Visual	5	60								0
	Contaminação da lona durante a passagem pelos roletes do centrador	Produto acabado defeituoso, bolhas, corpo estranho e refugo no processo posterior	9	CC	Roletes do centrador com graxa, óleo, água	1	S'S na área de trabalho e check list	Controle Visual, inspeção visual	5	45								0
	Posicionamento curso central do centrador com ângulo Irregular	Centragem do material apenas em uma escala	6	M	Não posicionamento do curso central do centrador	6	Check-list	Controle Visual	5	180	Reciclagem e treinamento operacional / Automatizar posicionamento	Especialista de Qualidade - 15/07 / Especialista de Manutenção						0

Tabela 2: 2º Ciclo da FMEA.

4.4. Modelagem dos tempos até falha e determinação do intervalo de manutenção

Neste passo buscou-se definir o modelo de distribuição que melhor se ajusta aos dados, através do Teste de Aderência e o Papel de Probabilidade. A partir da definição da distribuição, foi possível gerar os gráficos da função de confiabilidade ($R(t)$), função densidade de probabilidade ($f(t)$), e função de risco ($h(t)$). Para todos os estudos foi utilizado o *software* ProConf.

Na Figura 8 estão representados os testes de aderência para as distribuições Normal, Weibull, Lognormal e Exponencial. Os testes realizados permitem afirmar que a hipótese de que os dados seguem uma distribuição Exponencial é rejeitada, já os modelos Normal, Weibull e Lognormal não devem ser rejeitados. Com isso, é descartada a utilização do modelo Exponencial.

Teste Analítico do χ^2 :				
Limite Inferior	Limite Superior	Frequência Observada	Frequência Esperada	Valor do qui-quadrado
16848,	23712,	4	13,2	6,46
23712,	30576,	8	2,4	12,67
30576,	37440,	5	2,	4,46
37440,	44304,	5	1,7	6,79
44304,	51168,	2	1,4	0,30
51168,	acima	3	6,3	1,73

$\chi^2 = 32,42$ com 4 graus de liberdade Nível de Significância = 0,0001

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,4438 Nível de Significância = 0,0001

A hipótese de que a população segue o modelo Exponencial é rejeitada.

Teste Analítico do χ^2 :				
Limite Inferior	Limite Superior	Frequência Observada	Frequência Esperada	Valor do qui-quadrado
16848,	23712,	4	4,	0,00
23712,	30576,	8	5,1	1,60
30576,	37440,	5	6,6	0,39
37440,	44304,	5	5,8	0,12
44304,	51168,	2	3,5	0,65
51168,	acima	3	1,9	0,59

$\chi^2 = 3,34$ com 3 graus de liberdade Nível de Significância = 0,3418

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1324 Nível de Significância = 0,1793

A hipótese de que a população segue o modelo Normal não pode ser rejeitada.

Teste Analítico do χ^2 :				
Limite Inferior	Limite Superior	Frequência Observada	Frequência Esperada	Valor do qui-quadrado
16848,	23712,	4	3,4	0,09
23712,	30576,	8	6,8	0,20
30576,	37440,	5	7,	0,58
37440,	44304,	5	4,8	0,01
44304,	51168,	2	2,6	0,16
51168,	acima	3	2,3	0,25

$\chi^2 = 1,28$ com 3 graus de liberdade Nível de Significância = 0,7337

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1184 Nível de Significância = 0,2239

A hipótese de que a população segue o modelo Lognormal não pode ser rejeitada.

Teste Analítico do χ^2 :				
Limite Inferior	Limite Superior	Frequência Observada	Frequência Esperada	Valor do qui-quadrado
16848,	23712,	4	4,7	0,10
23712,	30576,	8	5,1	1,70
30576,	37440,	5	6,1	0,20
37440,	44304,	5	5,5	0,04
44304,	51168,	2	3,5	0,67
51168,	acima	3	2,1	0,34

$\chi^2 = 3,05$ com 3 graus de liberdade Nível de Significância = 0,3845

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1214 Nível de Significância = 0,2142

A hipótese de que a população segue o modelo Weibull não pode ser rejeitada.

Figura 8: Testes de Aderência dos Modelos de Distribuição.

O Papel de Probabilidade permite avaliar a proximidade dos dados modelados em relação à reta sugerida para a distribuição em estudo. Quanto mais próximos da reta, melhor é o ajuste da distribuição em questão. A Figura 9 demonstra os gráficos de Papel de Probabilidade para os modelos Normal, Weibull e Lognormal. Verifica-se que os modelos Normal e Weibull apresentam um comportamento semelhante.

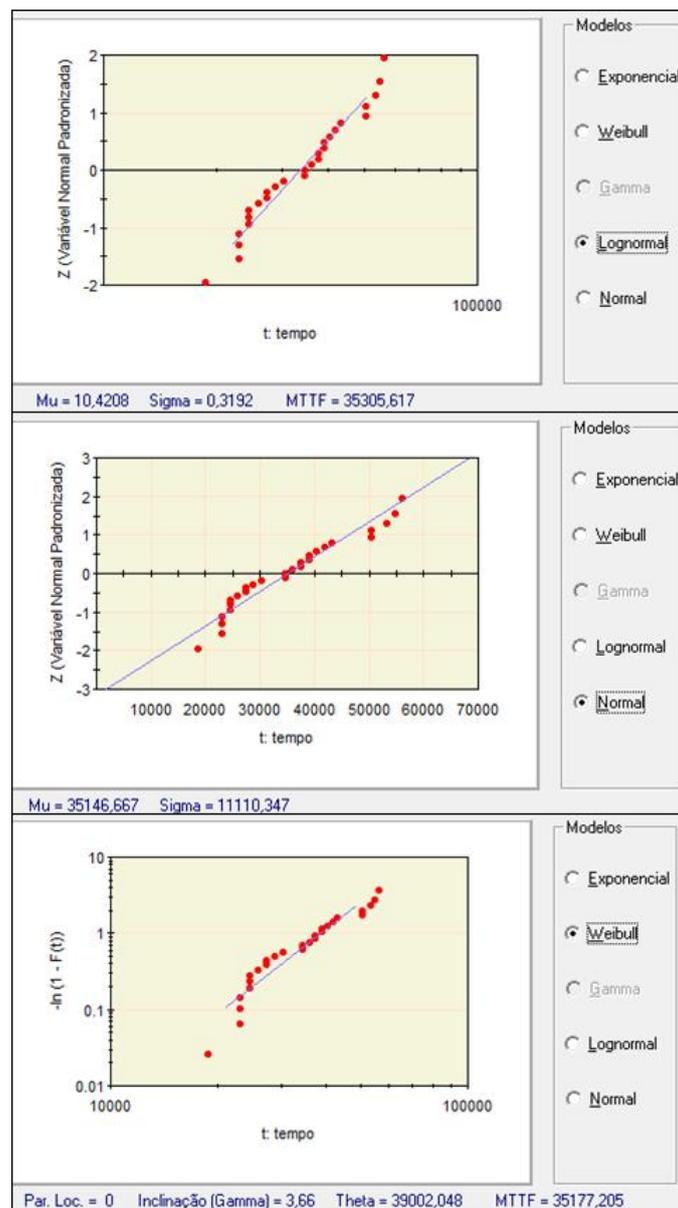


Figura 9 – Testes de Papel de Probabilidade dos Modelos de Distribuição.

Apesar da distribuição Normal se ajustar adequadamente aos dados, optou-se por utilizar a distribuição Weibull, pois a mesma apresenta vantagens quanto a sua flexibilidade (ajustes no parâmetro gamma fazem com que essa distribuição inclusive represente a distribuição normal). Além disso, a Weibull pode representar grande

variedade de modelos de falha, o que pode tornar este modelo mais vantajoso em relação ao Normal.

Na sequência, foram gerados os gráficos referentes ao estudo de confiabilidade para dados descritos pela distribuição de Weibull. A Figura 10 apresenta o gráfico função de confiabilidade ($R(t)$) do componente centrador; pode-se concluir que o perfil de confiabilidade do centrador apresenta uma tendência de decréscimo acentuado após 20000 minutos de operação, reduzindo significativamente o patamar de confiabilidade do equipamento.

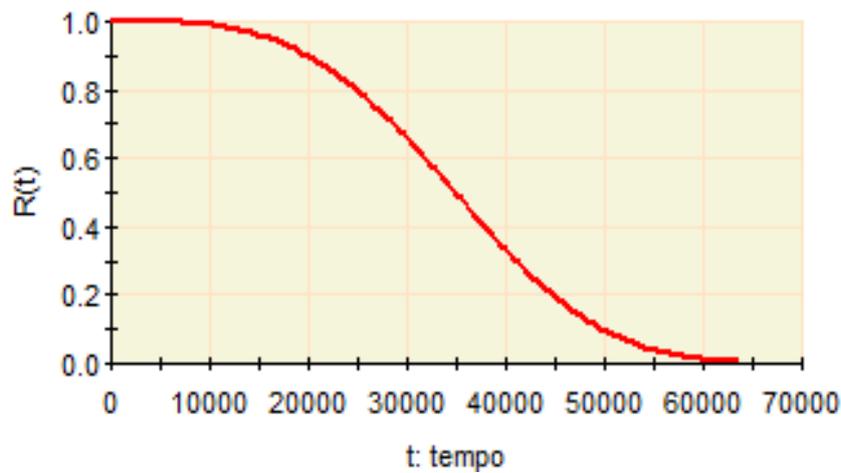


Figura 10 - Função de Confiabilidade ($R(t)$).

Pode-se observar na Figura 11 o gráfico da função densidade de probabilidade ($f(t)$). A análise do gráfico mostra que a grande concentração de falhas do centrador ocorre em torno de 35000 minutos, passando a decrescer depois disso.

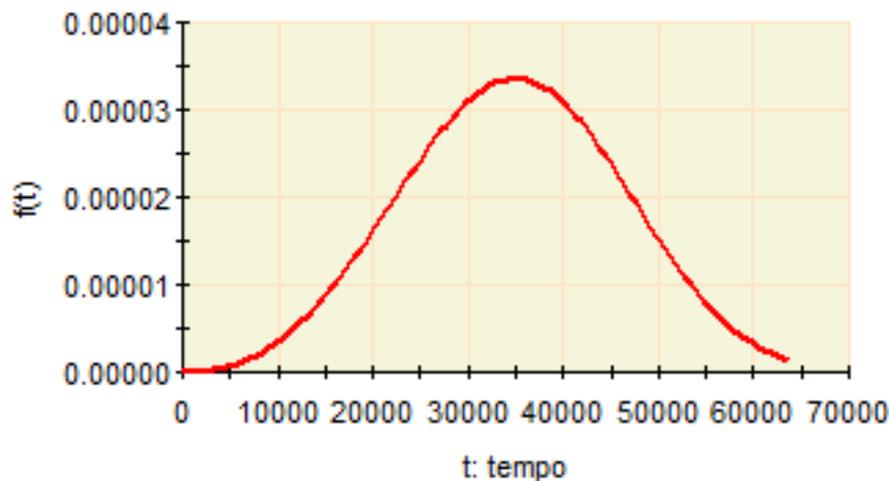


Figura 11 - Função Densidade de Probabilidade ($f(t)$).

Avaliando a Figura 12, a qual demonstra o gráfico da função de risco ($h(t)$), pode-se observar que a função de risco apresenta um comportamento crescente.

Tal crescimento é suave até aproximadamente 20000 minutos, elevando-se muito depois disso.

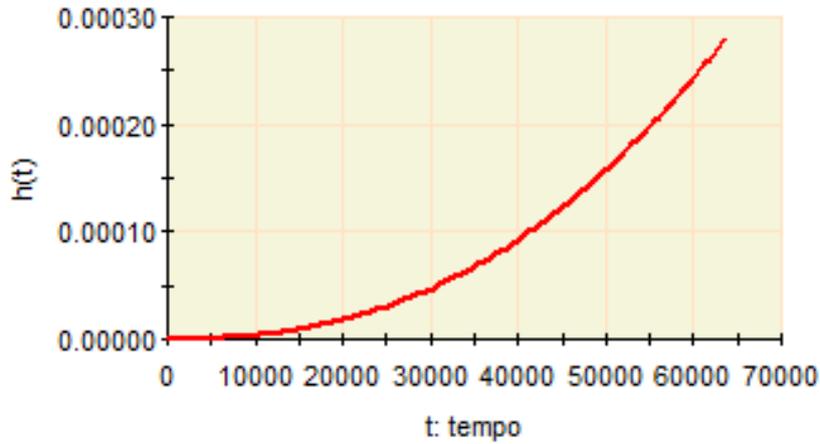


Figura 12 – Função de Risco (h(t)).

Para se definir o intervalo de manutenções preventivas, é necessário que se determine um nível padrão de confiabilidade. Em consenso com a empresa, um nível de confiabilidade mínimo para o centrador deve ser de 85%. Assim, determina-se que o intervalo de manutenções preventivas para este componente é de aproximadamente 22600 minutos de operação, como pode-se observar na Figura 13.

Modelo e Estatísticas | Funções de Confiabilidade | Gráficos

Modelo de Distribuição

Exponencial Lognormal
 Weibull Normal
 Gamma

Função Densidade de Probabilidade:

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right]$$

Parâmetros da distribuição

Localização: 0 γ : 3,3666 θ : 38832,375

Inferências

Tempo: 22636,243 Calcular Confiabilidade Calcular Tempo Confiabilidade: 0,85

Tempo Médio até a Falha = 34868,621 Desvio Padrão = 11426,836

Figura 13 – Determinação da Confiabilidade.

Outra medida importante para determinação dos intervalos de manutenção é o MTTF (*Mean Time to Failure*). As falhas eletrônicas modeladas na Distribuição de Weibull tem um MTTF de aproximadamente 34800 minutos.

5. Conclusão

O constante monitoramento da confiabilidade dos sistemas de uma empresa é fundamental para a garantia da qualidade e segurança de seus produtos. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo elaborar uma FMEA para hierarquização dos modos de falha e determinar um intervalo de manutenções preventivas para o componente estudado, a fim de garantir a confiabilidade dos seus elementos.

Através da aplicação da ferramenta FMEA, pretendeu-se identificar e quantificar os potenciais modos de falha, a fim de reduzir falhas que podem gerar problemas de qualidade do produto final. Nesta etapa foi organizada uma equipe multidisciplinar, a qual definiu todas as formas pelas quais o processo poderia falhar, bem como o impacto sofrido pelo cliente e/ou sistema caso uma delas ocorresse. A partir da implementação da FMEA, foi possível identificar os maiores riscos (NPR), definindo ações aos mesmos. Realizando novos ciclos da FMEA, verifica-se que outros modos de falha passam a ser críticos, tornando-se então foco para melhorias.

Para determinar o intervalo de manutenções, foi realizado o cálculo de tempo até falha através de informações obtidas no banco de dados da empresa. Com a análise do tempo médio de reparo dos sub-conjuntos, especialidades e elementos da máquina, apenas as falhas eletrônicas do centrador foram analisadas. Utilizou-se o *software* ProConf para realizar os testes de aderência e os gráficos de papel de probabilidade, com os quais foi possível afirmar que as distribuições das falhas do centrador seguem o modelo de Weibull. A partir da definição do modelo, foram gerados os gráficos de densidade de falha ($f(t)$), função de risco ($h(t)$) e de confiabilidade ($R(t)$) para o modo de falha. Definida a confiabilidade desejada no sistema, 85%, os intervalos entre intervenções foram definidos através do gráfico de confiabilidade.

Observando-se o objetivo principal do estudo, pode-se concluir que o mesmo foi atingido, uma vez que o intervalo de manutenção estimado para o centrador (22600 minutos) foi considerado coerente pela equipe de especialistas e, através da FMEA, foi possível identificar os modos preponderantes do equipamento. Caso as demais proposições deste artigo sejam efetivamente levadas a cabo, a mesma terá a garantia de que o componente está trabalhando de forma correta (ou seja, acoplando os materiais sem a incidência de refugo por material descentrado).

Referências

- ANDERY, P. R. P.; HELMAN, H., Análise de falhas (Aplicação dos métodos de FMEA e FTA). Belo Horizonte: QFCO, 1995.
- ALVES, M. D.; COSTA, J. M., Estratégias de gestão de obras de arte baseada em uma análise de risco segundo a FMEA. Seção de construções civis e FEUP Edições. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 13-15, 2004.
- ALVES, R. P.; FALSARELLA, O. M. Modelo conceitual de inteligência organizacional aplicada à função manutenção. Revista Gestão & Produção, v. 16, n. 2, 2009, p. 313-324.
- AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C. FMEA - Análise do Tipo e Efeito de Falha. São Carlos, 2006.
- ARAÚJO, D. R. C.; BORCHARDT, M.; SELLITTO, M. A. Manutenção Centrada em Confiabilidade: Aplicando uma Abordagem Quantitativa. In: ENEGEP, Curitiba, out. 2002.
- ARRUDA, J. P.S.; SIMONETTI, J. M.; SILVEIRA, L. F. S.; SOUZA, A. L. A importância da engenharia da confiabilidade e os conceitos básicos de distribuição de Weibull. Revista Sapere, n. 1, 2009.
- BARROS, J. F. R.; LIMA, G. B. A. A gestão da manutenção no plano estratégico dos empreendimentos industriais. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão, ago. 2011.
- CAMPOS, Vicente Falconi. TQC – Controle da qualidade total. Belo Horizonte, 1992. Ed. Edg.
- CROWE, D.; FEINBERG, A. *Desing for Reliability*, Boca Raton: CRC Press, 2001. 220p.
- DIAS, A. Confiabilidade na Manutenção Industrial, 2005.
- DIAS, A. Metodologia para Análise da Confiabilidade em Freios Pneumáticos Automotivos. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 199p, 1996. Tese (Doutorado).
- DORNELES, V.; MATSCHULAT, E.; RODRIGUES, D. Análise de Modo e Efeito de Falha Potencial – FMEA – Apostila e Tabelas Recomendadas para Severidade Ocorrência e Detecção. São Leopoldo, 2010.
- ELSAIED, E. A. *Reliability engineering*. Massachusetts: Addison Wesley, 1996.
- FERNANDES, M. R.; R., M. G. Proposta de um Método para Integração entre QFD e FMEA. Revista Gestão e Produção, v. 13 n. 2, 2006, p.245-259.
- FILHO, G. B. Dicionário de Termos de Manutenção e Confiabilidade. Ciência Moderna, 2000.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. Confiabilidade e Manutenção Industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- FLEMING, P. V.; FRANÇA, S. R. R. O.; SILVA, M. F. Aplicando Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) em Indústrias Brasileiras: Lições aprendidas. . In: ENEGEP, 1999.
- GUZZON, S. O. Proposta de Análise Quantitativa de Confiabilidade a Partir de Dados Qualitativos Provenientes da FMEA. Porto Alegre, de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2009.
- HECHT, H. *Systems reliability and failure prevention*. Boston: Artech House, 2004.
- JUNIOR, R. P. S. P.; SANT`ANNA, A. P. Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA. Revista Sistemas & Gestão, v. 05, n. 03, 2010, p. 179-191.
- LAFRAIA, J. R. B. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2006.
- LEEMIS, L. *Reability: probabilistic models and statistical methods*. Nova York: Prentice-Hall, 1995.
- LEWIS, E. *Introduction to reliability engineering*. USA: John Wiley & Sons, 1996.

- LIMA, C. R. C.; MARCORIN, W. R. Análise dos Custos de Manutenção e de Não-manutenção de Equipamentos Produtivos. Revista Ciência e Tecnologia, v. 11, n. 22, 2003, p. 35-42.
- MACHADO, W. V.; OTANI, M. A Proposta de Desenvolvimento de Gestão da Manutenção Industrial na Busca da Excelência ou Classe Mundial. Revista Gestão Industrial, v. 04, n. 02, 2008, p. 01-16.
- MATOS, R. B.; MILAN, M. Aplicação Sistêmica do Análise do Modo de Falhas e Efeitos (FMEA) para o Desenvolvimento de Indicadores de Desempenho de Empresas de Pequeno Porte. R. Árvore, Viçosa-MG, v.33, n.5, p.-977-985, 2009.
- MIRSHAWKA, V. Manutenção Preditiva – Caminho para Zero Defeitos. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.
- MOTA, J. G. D. Inspeção baseada em risco aplicada ao planejamento de paradas de manutenção. In: PANNDT, Rio de Janeiro, jun. 2003.
- PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. Manutenção: função estratégica. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- SELLITTO, M. A. Formulação Estratégica da Manutenção Industrial com Base na Confiabilidade dos Equipamentos. Revista Produto & Produção, v. 5, n. 1, 2005, p. 44-59.
- SIQUEIRA, I. P. Manutenção Centrada em Confiabilidade – Manual de Implementação. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.
- SMITH, A. M. *Reliability Centred Maintenance*. McGraw Hill INC, 1993.
- XAVIER, J. A. N. Manutenção: Tipos e Tendências. Disponível em <http://www.engeman.com.br/site/ptb/artigostecnicos.asp/manutencaotiposetendencias.zip>, 2005. Acesso em 16 Out. 2011.