

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Manutenção Centrada em Confiabilidade: uma
abordagem quantitativa**

Angélica Alebrant Mendes

Porto Alegre
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Manutenção Centrada em Confiabilidade: uma
abordagem quantitativa**

Angélica Alebrant Mendes

Orientador: Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Porto Alegre
2011

ANGÉLICA ALEBRANT MENDES

Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Orientador PPGEP / UFRGS

Profa. Carla S. ten Caten, Dr.
Coordenador PPGEP / UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Michel Jose Anzanello, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Prof. Miguel Afonso Sellitto, Dr. (PPGEPS/UNISINOS)

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes, Dr. (PPGEC/UFRGS)

“Quem sabe concentrar-se numa coisa e insistir nela como único objetivo, obtém, ao fim e ao cabo, a capacidade de fazer qualquer coisa” (Mahatma Gandhi).

*Dedico este trabalho a minha mãe, Ivanir
Alebrant, que sempre me incentivou e me
apoiou para a conclusão do mestrado.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. José Luís Duarte Ribeiro, pela paciência, dedicação e pelo conhecimento transmitido, fato que foi fundamental para a realização desta dissertação de mestrado.

Gostaria de expressar meus agradecimentos aos professores do Departamento de Engenharia de Produção e Transportes pelos conteúdos ensinados.

Aos membros da banca, Prof. Michel Jose Anzanello, Prof. Miguel Afonso Sellitto e Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes, por participarem nesta defesa e colaborarem para discussão e conclusão deste trabalho.

Aos membros da empresa prestadora de serviços de manutenção pela disponibilidade e confiança com a qual me receberam, cedendo informações e trocando conhecimentos para a realização desta dissertação.

Aos meus pais (Ivanir e Delmir), irmãs (Verônica e Graziella), namorado (Luiz Henrique) e amigos pelo incentivo e paciência que dispensaram a mim, para que conseguisse alcançar mais um objetivo em minha vida.

MENDES, A. A. *Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RESUMO

Diante da crescente importância da gestão da manutenção para o aumento da competitividade das empresas e a deficiência existente na literatura quanto à abordagens quantitativas da MCC, o tema desta dissertação é a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), abordada a partir de análises quantitativas. Seu principal objetivo é explorar as análises quantitativas que possam ser usadas no âmbito da MCC para contribuir na elaboração de planos de manutenção. Inicialmente, foram identificados, através de pesquisa da literatura e entrevistas em empresas manufatureiras, métodos quantitativos que poderiam dar suporte a MCC. Entre os métodos quantitativos identificados, destaque para o uso de distribuições de probabilidade, que suporta várias atividades da MCC. Os métodos de Engenharia Econômica e a simulação de Monte Carlo também merecem destaque, pois permitem análises mais sofisticadas associadas a custo e desempenho de sistemas produtivos sujeitos à manutenção. Posteriormente, foram elaborados dois métodos para desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos: um para um cenário de produção *just in time* e outro para um cenário de produção protegido por estoques. Ambos os métodos envolveram o uso de distribuições de probabilidade, simulação de Monte Carlo e análise de sensibilidade. A aplicação dos métodos é ilustradas através de estudos reais realizados em linhas de uma empresa do setor de tintas e corantes.

Palavras-chave: Manutenção centrada em confiabilidade, métodos quantitativos, simulação de Monte Carlo, sistema *just in time*, sistema de produção protegido por estoques, plano de manutenção.

MENDES, A. A. *Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

ABSTRACT

Due to the growing importance of maintenance management to increase the competitiveness of companies and the deficiency in the literature concerning quantitative approaches to RCM, the subject of this dissertation is the Reliability Centered Maintenance (RCM), approached from quantitative analysis. Its main objective is to explore quantitative analysis to be used in the scope of RCM and contribute for the construction of maintenance plans. Initially, quantitative methods that could support RCM were identified through literature research and interviews in manufacturing companies. Among the quantitative methods identified, probability distributions stood out for supporting various RCM activities. The methods of Economic Engineering and Monte Carlo simulation were also emphasized since they allow more sophisticated analysis related to cost and performance of production systems subjected to maintenance. Later, two methods to develop quantitative analysis for guiding the review or preparation of a maintenance plan for equipment were developed: one suited for a just-in-time production scenario and other for a scenario of production protected by stocks. Both methods involved the use of probability distributions, Monte Carlo simulation and sensitivity analysis. The methods were illustrated through a real applications in manufacturing lines of a paints and dyes production company.

Keywords: Reliability Centered Maintenance, quantitative methods, Monte Carlo simulation, Just-in-time system, production system protected by stocks, maintenance plan.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC – Sistema de custeio baseado em atividades

COFA – Análise de consequências de falhas

FMEA – Análise de modos e efeitos de falha

FMECA – Análise de modos, efeitos e criticidade de falhas

JIT – Sistema de produção *just in time*

LCC – Custo do ciclo de vida

MCC – Manutenção centrada em confiabilidade

MFT – Método do tempo médio de fluxo

MPT – Manutenção produtiva total

MRPII – Sistema de planejamento dos recursos de manufatura

MTBF – tempo médio de bom funcionamento

MTBI – tempo médio entre interrupções

MTTR – tempo médio de reparo

OEE – Índice de eficiência global do equipamento

PROCONF – programa computacional de confiabilidade

TEEP – Índice de eficiência de desempenho do equipamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Comentários Iniciais	11
1.2 Conceituação	12
1.3 Tema e Objetivos	13
1.4 Justificativa do Tema e Objetivos.....	13
1.5 Método	14
1.6 Delimitações do trabalho.....	16
1.7 Estrutura do trabalho	17
2 PRIMEIRO ARTIGO	19
Um estudo do suporte quantitativo necessário para a operacionalização da MCC	19
3 SEGUNDO ARTIGO	41
Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da MCC em um cenário de produção <i>JIT</i>	41
4 TERCEIRO ARTIGO	60
Dimensionamento da manutenção preventiva em cenários de produção protegida por estoques.....	60
5 COMENTÁRIOS FINAIS	82
5.1 Conclusões.....	82
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comentários Iniciais

O cenário atual, economicamente globalizado e altamente competitivo, exige que as empresas visualizem a manutenção como uma função estratégica para aumentar a produtividade. Visto que a produtividade está diretamente relacionada à redução dos custos e pode propiciar aumento de faturamento, melhorias na confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos produtivos podem contribuir significativamente para aumentar a competitividade das organizações (SANTOS *et al.*, 2007; MÁRQUEZ *et al.*, 2009; NIU *et al.*, 2010). Além disso, a melhoria das atividades de manutenção pode conduzir a melhorias na segurança, nas relações com o meio ambiente e no atendimento aos requisitos normativos da empresa (BLOOM, 2006; RAUSAND, 1998).

O setor de manutenção de grande parte das plantas industriais ainda opera de forma reativa, aplicando manutenções corretivas ou manutenções preventivas mal planejadas e insuficientes. Poucas empresas aproveitam o potencial da manutenção preventiva associada ao uso de técnicas preditivas, viabilizado através de novas tecnologias atualmente disponíveis (DEHPAND; MODAK, 2001).

Para Bevilacqua *et al.* (2000), a definição da melhor solução de manutenção deve ser analisada individualmente de equipamento para equipamento, levando em consideração sua taxa de falha, o custo da manutenção e o impacto da falha no sistema produtivo. Em outras palavras, é necessário decidir para cada equipamento se é mais vantajoso prevenir ou esperar a falha.

Visando aumentar sua competitividade através de melhorias na gestão da manutenção de seus equipamentos, as organizações têm buscado programas de manutenção como, por exemplo, a Manutenção Produtiva Total (MPT) ou a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC). Para Fogliatto e Ribeiro (2009), os programas de MCC têm se mostrado uma forma eficiente de tratar questões de manutenção. Devido a sua abordagem racional e sistemática, estes programas permitem que as empresas alcancem excelência nas atividades de manutenção através da ampliação da disponibilidade e redução dos custos associados a acidentes, defeitos, reparos e substituições.

O principal objetivo da MCC é criar rotinas estratégicas de manutenção que assegurem que os equipamentos da planta industrial continuarão desempenhando suas funções

predeterminadas da forma mais econômica possível (WILMETH; URSEY, 2000; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; RAUSAND, 1998).

Um estudo da literatura revela que, embora muitos livros e artigos tratem da MCC, a grande maioria aborda apenas questões qualitativas da MCC, deixando uma lacuna quanto às questões quantitativas, as quais podem efetivamente contribuir para o aumento da confiabilidade dos sistemas (RAO *et al.*, 1996; SANTOS *et al.*, 2007).

1.2 Conceituação

A seguir são apresentados alguns conceitos utilizados neste trabalho a fim de facilitar o seu entendimento.

Manutenção preditiva: atividade de manutenção que envolve o monitoramento da condição do equipamento para identificação de falhas iminentes.

Manutenção preventiva: atividade de manutenção planejada para prevenir a ocorrência de falhas.

Manutenção corretiva: atividade de manutenção de reparo de equipamento após a ocorrência de falha. A manutenção corretiva pode ser planejada, quando o equipamento é determinado para rodar-até-a-falha, ou de emergência, quando a ocorrência da falha não é esperada.

Just in time: sistema de produção que determina que nada pode ser produzido, transportado ou comprado antes da hora exata. Este sistema busca a redução dos estoques através do atendimento da demanda no exato momento e quantidade solicitadas pelo cliente.

Produção protegida por estoque: sistema de produção que mantém estoques armazenados a fim de garantir o nível de serviço desejado e absorver flutuações de demanda ou paradas na linha de produção.

Simulação de Monte Carlo: método estatístico utilizado em simulações estocásticas com diversas aplicações. Envolve a modelagem de um sistema de interesse e a geração de números aleatórios oriundos de distribuições de probabilidade que representam o comportamento de elementos do sistema e uso dos resultados para aproximar a resposta de interesse.

1.3 Tema e Objetivos

Diante da crescente importância da gestão da manutenção para o aumento da competitividade das empresas e a deficiência existente na literatura quanto a abordagens quantitativas da MCC, o tema desta dissertação é a Manutenção Centrada em Confiabilidade, abordada a partir de análises quantitativas.

Esta dissertação tem como objetivo principal explorar análises quantitativas que possam ser utilizadas no âmbito da MCC e contribuam para a revisão e elaboração de planos de manutenção. Como objetivos secundários, têm-se: *i)* analisar o tipo de suporte quantitativo que as empresas necessitam para a operacionalização da MCC; *ii)* desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção *just in time*, caracterizado por estoques reduzidos (ou nulos) e a necessidade de atender a programação da produção no próprio turno de trabalho; *iii)* desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção protegida por estoques, caracterizado pela existência de estoques finitos, de forma que a linha de produção não é necessariamente interrompida pela quebra de um equipamento.

1.4 Justificativa do Tema e Objetivos

Do ponto de vista acadêmico, a discussão de métodos quantitativos que possam ser utilizados juntamente com a abordagem tradicional da MCC é um tema relevante, devido à carência de tal discussão na literatura e ao diferencial que o uso de métodos quantitativos pode representar para as organizações.

A principal justificativa para o tema proposto está associada à importância da gestão da manutenção no cenário competitivo atual, onde confiabilidade e custos operacionais reduzidos são importantes diferenciais para as empresas. Nesse sentido, o estudo do suporte quantitativo necessário à operacionalização da MCC é importante para que, posteriormente, possam ser desenvolvidos procedimentos que incluam essa abordagem quantitativa na programação da manutenção. Esses procedimentos podem auxiliar as empresas a reduzir custos de manutenção e a aumentar a disponibilidade de seus equipamentos.

O uso de análises quantitativas na elaboração de planos de manutenção é fundamental para a compreensão do tipo e do intervalo de manutenção mais adequado ao comportamento da taxa de falhas de cada equipamento. Assim, é possível definir a melhor estratégia de manutenção para cada equipamento, evitando a aplicação de atividades de manutenção

desnecessárias ou ineficazes e agregando atividades que efetivamente contribuem para o aumento da disponibilidade dos equipamentos e redução de custos operacionais.

Da mesma forma, o dimensionamento da manutenção preventiva, através de análises quantitativas, considerando o tipo de cenário produtivo envolvido, é essencial para prever a real capacidade produtiva e evitar gastos desnecessários ou insuficientes em atividades de manutenção, bem como para orientar projetos de melhorias que efetivamente contribuam para o melhor atendimento da demanda.

1.5 Método

Quanto a sua natureza, esta pesquisa classifica-se como pesquisa aplicada, onde se objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Os métodos quantitativos que serão discutidos podem ser empregados para contribuir na programação da manutenção de empresas de setores diversos.

Quanto à forma de abordagem do problema, esta pesquisa classifica-se como pesquisa qualitativa e quantitativa. A base da pesquisa qualitativa é a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados, não requerendo o uso de métodos e técnicas estatísticas. A pesquisa quantitativa, por sua vez, considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-los e analisá-los (SILVA; MENEZES, 2005). Nesta pesquisa, a abordagem qualitativa será usada na pesquisa das principais atividades da MCC e dos métodos quantitativos que fornecem suporte a essas atividades. Paralelamente, a abordagem quantitativa será usada no desenvolvimento e aplicação de métodos que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção *just in time* e em um cenário de produção protegido por estoques.

Do ponto de vista de seus objetivos, esta pesquisa classifica-se como exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito. Envolve levantamento bibliográfico e entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado. O levantamento bibliográfico concentrou-se nos tópicos associados à MCC. As entrevistas contemplaram engenheiros e gerentes responsáveis pela manutenção em sete empresas dos setores metal-mecânico e eletrônico. Todas são empresas de grande porte, que se destacam em seus mercados específicos.

Quanto aos seus procedimentos técnicos, esta pesquisa classifica-se como estudo de campo e pesquisa-ação. A pesquisa de campo é desenvolvida por meio da observação direta

das atividades do grupo estudado e de entrevistas com informantes para captar suas explicações e interpretações do que ocorre na prática (GIL, 2002). A pesquisa-ação é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo (GIL, 1999). O desenvolvimento das propostas apresentadas nesta dissertação foi facilitado em função do contato com uma empresa de tal tipo e da necessidade de resolver problemas concretos dessa empresa.

O desenvolvimento desta dissertação foi feito a partir de oito etapas. A primeira etapa envolveu o estudo teórico sobre a questão da Manutenção Centrada em Confiabilidade, buscando identificar as atividades essenciais da MCC e o suporte quantitativo que a MCC necessita.

A segunda etapa envolveu a realização de entrevistas em empresas que executam manutenção, para verificar se utilizam os métodos quantitativos e, paralelamente, identificar outros métodos que possam ser necessários e que não são reportados na literatura. O método utilizado para a realização das entrevistas foi a entrevista não-estruturada focalizada. O relato destas entrevistas sumariza as percepções de profissionais que atuam na gestão da manutenção relativas à MCC.

Na terceira etapa, foi elaborado, através da união dos resultados de atividades e métodos da primeira e segunda etapas, um quadro comparativo associando métodos quantitativos e atividades da MCC. Este quadro visa associar as principais atividades da MCC aos métodos quantitativos que podem fornecer suporte a essas atividades.

A quarta etapa envolveu a definição da empresa onde o estudo aplicado seria realizado e o levantamento e modelagem dos dados de tempos de bom funcionamento, tempos de reparo e ocupação da linha. O método idealizado foi aplicado na filial gaúcha de uma empresa multinacional do setor de tintas e corantes. Escolheu-se, para o primeiro estudo, a linha de rotulagem e enchimento de galões, chamada *Packer*, e para o segundo estudo, a linha de rotulagem e enchimento de *sprays*, chamada *Colorjet*, ambas devido a sua criticidade em termos de ocupação e número de chamados de manutenção.

Na quinta etapa foi desenvolvido um estudo de simulação de Monte Carlo das atividades de produção, falhas e manutenção. Essa simulação permitiu estudar, através de métodos estocásticos, a probabilidade da linha não atender a demanda diária de produção

devido ao possível desequilíbrio entre as horas de trabalho demandadas e as horas disponíveis, que podem ser reduzidas em função de falhas e respectivos reparos, considerando um cenário *just in time*. A simulação envolveu a determinação da ocupação diária da linha, com base nos dados de ocupação, a identificação da ocorrência da falha, com base nos tempos de bom funcionamento e a definição dos tempos de reparo, utilizando-se a distribuição dos mesmos.

A sexta etapa contemplou a realização de uma análise de sensibilidade das horas-extras e horas de parada de máquina da linha a variações na demanda, tempos de bom funcionamento e tempos de reparo. Foram gerados gráficos, representando cenários onde foram variados a demanda, o *MTBF* e o *MTTR*, permitindo a visualização do impacto dessas variáveis sobre as horas-extras.

A sétima etapa envolveu o desenvolvimento de um estudo de simulação de Monte Carlo das atividades de produção, falhas e manutenção considerando agora um cenário de produção protegido por estoques. Essa simulação permitiu estudar, através de métodos estocásticos, a probabilidade de ocorrência de interrupção da expedição dos produtos da linha, e conseqüente não atendimento da demanda, devido à falta de itens disponíveis. Essa interrupção ocorre devido a tempos de reparo elevados que levam ao consumo do estoque de proteção. A simulação envolveu a determinação das probabilidades de falha diária para cada subconjunto, a identificação da ocorrência de falhas, a definição de tempos de reparo e a comparação destes tempos de reparo com o estoque de proteção disponível.

A última etapa contemplou a realização de uma análise de sensibilidade da interrupção da expedição, em horas por ano, a variações nos tempos de reparo e na quantidade de estoque de proteção disponível. Foram geradas tabelas e gráficos a fim de demonstrar os resultados da simulação para dois cenários de manutenção (atual e otimizado) e verificar o impacto da redução do estoque de proteção e do tempo médio de reparo na interrupção da expedição.

1.6 Delimitações do trabalho

A pesquisa de campo realizada neste trabalho limitou-se a identificar os métodos quantitativos que podem dar suporte às atividades da MCC. Aprofundamentos relativos à implementação e operacionalização desses métodos no processo de manutenção foram realizados para o uso da simulação de Monte Carlo. Aprofundamentos associados aos demais métodos quantitativos são sugestões para trabalhos futuros. Além disso, o estudo restringiu-se às sete empresas estudadas, pertencentes aos setores eletrônico e metal-mecânico. Não foram

visitadas empresas de setores de maior risco, como, por exemplo, os setores aeroespacial, nuclear e petroquímico, onde o tratamento das questões de manutenção e confiabilidade pode seguir outras diretrizes.

A pesquisa-ação deste trabalho limitou-se ao estudo de dois cenários produtivos: onde é possível o uso de horas extras para compensar picos de demanda ou paradas devido a quebra de conjuntos e onde existem estoques finitos que podem absorver paradas de manutenção até um certo limite de tempo. Outros cenários, por exemplo, onde não é possível o uso de horas extras ou não existem estoques de proteção exigiriam abordagens diferenciadas.

1.7 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema, justificando a importância da manutenção centrada em confiabilidade, abordada a partir de métodos quantitativos, para a competitividade das empresas no contexto atual. Este capítulo também apresenta os objetivos, o método de trabalho, a estrutura e as limitações do estudo.

O segundo capítulo apresenta um artigo contendo um estudo do suporte quantitativo necessário à operacionalização da MCC. Inicialmente, foram identificadas na literatura dez atividades consideradas essenciais para a operacionalização da MCC e os métodos quantitativos que podem dar suporte a esta metodologia. A seguir, foram realizadas entrevistas em empresas manufatureiras a fim de verificar a utilização dos métodos descritos na literatura e identificar outros métodos utilizados. Como resultado, foi elaborado um quadro que associa as atividades essenciais da MCC aos métodos quantitativos, juntamente com uma breve descrição das contribuições de cada método.

O terceiro capítulo apresenta o segundo artigo que compõe esta dissertação. Neste artigo é apresentado um método para desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção *just in time*. A aplicação do método é ilustrada através de um estudo real realizado em uma linha de rotulagem e enchimento de galões de uma empresa do setor de tintas e corantes. A aplicação do método permitiu identificar com clareza os conjuntos e sub-conjuntos críticos frente ao cenário produtivo em questão.

O quarto capítulo apresenta o terceiro artigo, abordando a elaboração de um método para desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção protegida por estoques. A aplicação

do método é ilustrada através de um estudo real realizado em uma linha de rotulagem e enchimento de *sprays* de uma empresa do setor de tintas e corantes. Os resultados obtidos permitiram estabelecer recomendações referentes à melhor estratégia de manutenção, tamanho do estoque de proteção e metas para tempos médios de reparo.

O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir do trabalho desenvolvido, esclarecendo as limitações da pesquisa. Neste capítulo também são propostas sugestões para trabalhos futuros, que possam dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

2 PRIMEIRO ARTIGO

Um estudo do suporte quantitativo necessário para a operacionalização da MCC

Resumo

Este artigo investiga o suporte quantitativo necessário à operacionalização da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC). Inicialmente, foram identificadas na literatura dez atividades consideradas essenciais para a operacionalização da MCC e os métodos quantitativos que podem dar suporte a esta metodologia. A seguir, foram realizadas entrevistas em empresas manufatureiras a fim de verificar a utilização dos métodos descritos na literatura e identificar outros métodos utilizados. Como resultado, foi elaborado um quadro que associa as atividades essenciais da MCC aos métodos quantitativos, juntamente com uma breve descrição das contribuições de cada método. Entre os métodos quantitativos identificados, destaque para o uso de distribuições de probabilidade, que suporta várias atividades da MCC. Os métodos de Engenharia Econômica e a simulação de Monte Carlo também merecem destaque, pois permitem análises mais sofisticadas associadas a custo e desempenho de sistemas produtivos sujeitos à manutenção.

Palavras-chave: manutenção centrada em confiabilidade, métodos quantitativos, indústria metal-mecânica, indústria eletrônica.

Abstract

This article investigates the quantitative support necessary for the operation of Reliability Centered Maintenance (RCM). Initially, ten essential activities for operation of RCM and quantitative methods that can support such activities were identified in literature. Next, interviews were conducted in manufacturing companies to verify the use of the methods described in literature and identify other methods used. As a result, a framework that associates the RCM essential activities with the quantitative methods was created, along with a brief description of each method contribution. Among the quantitative methods identified, probability distributions stood out for supporting various RCM activities. The methods of Economic Engineering and Monte Carlo simulation were also emphasized since they allow

more sophisticated analysis related to cost and performance of production systems subjected to maintenance.

Key-words: reliability centered maintenance, quantitative methods, metallurgical industry, electronics industry.

INTRODUÇÃO

A competitividade entre as empresas tem conduzido as organizações a buscarem novas estratégias de mercado e reduzirem seus custos operacionais. A melhoria das atividades de manutenção pode, não somente, reduzir estes custos, como também proporcionar melhorias na segurança, nas relações com o meio ambiente e no atendimento aos requisitos normativos da empresa (BLOOM, 2006; RAUSAND, 1998).

Tradicionalmente, a manutenção é planejada utilizando-se a experiência dos funcionários envolvidos e a orientação contida nos manuais dos fabricantes dos equipamentos (LAFRAIA, 2001; RAUSAND, 1998). Sabe-se que grande parte dos funcionários acredita na premissa de que as falhas ocorrem devido ao desgaste no tempo e que revisões ou substituições periódicas reconstituem a condição inicial do equipamento (WILMETH; USREY, 2000). Contudo, estudos feitos na aviação determinaram que apenas 11% dos componentes falham devido a desgaste e fadiga (LAFRAIA, 2001; WILMETH; USREY, 2000). Paralelamente, no que concerne às orientações contidas nos manuais dos fabricantes, corre-se o risco dessas recomendações não serem baseadas em dados reais, pois alguns fabricantes de equipamentos, a fim de maximizar vendas de componentes ou minimizar sua responsabilidade, orientam intervalos curtos de revisão e substituição (LAFRAIA, 2001; RAUSAND, 1998).

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) é um programa que combina técnicas de engenharia em uma abordagem sistemática a fim de garantir que os equipamentos fabris mantenham suas funções originais (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Para Hansen (2006), a MCC desenvolve estratégias de manutenção que combinam princípios de disponibilidade dos equipamentos, confiabilidade, qualidade do produto, segurança e meio ambiente. Através destes princípios, a MCC busca desenvolver um programa ótimo de manutenção (BLOOM, 2006).

Segundo Rausand (1998), a MCC possibilita a redução de custos de manutenção por meio da priorização das funções mais importantes do sistema, agregando atividades de

manutenção estritamente necessárias para a continuidade destas funções e evitando ou removendo ações de manutenção desnecessárias.

A base de trabalho da MCC pode ser representada através de uma *FMEA* modificada, onde se definem as funções e padrões de desempenho dos equipamentos, seus modos de falha, as causas e consequências dessas falhas e, conseqüentemente, a criticidade da falha para a linha de produção e o tipo de manutenção recomendada - preventiva, corretiva, preditiva ou rodar até a falha (BLOOM, 2006; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Um estudo da literatura revela que, embora muitos livros e artigos tratem da MCC, a grande maioria aborda apenas questões qualitativas da MCC, deixando uma lacuna quanto às questões quantitativas, as quais poderiam efetivamente contribuir para o aumento da confiabilidade dos sistemas (RAO *et al.*, 1996).

Wilmeth e Usrey, 2000 e Rao *et al.*, 1996 afirmam que, apesar da MCC ser um excelente método para a definição de listas de atividades de manutenção, ela usualmente não aborda questões relacionadas à definição da periodicidade destas atividades. Rausand (1998) explica que a determinação de intervalos ótimos entre as manutenções é difícil por que deve ser baseada em informações sobre taxa de falhas e custos das falhas e da manutenção preventiva. Na mesma linha, Rao *et al.* (1996) afirma que abordagens qualitativas têm sido preferidas às abordagens quantitativas devido à falta de dados históricos das plantas e de métodos estatísticos adequados para interpretar esses dados. Complementando suas idéias, Rausand (1998) afirma que os artigos sobre otimização da manutenção são escritos por pesquisadores matemáticos ou estatísticos que utilizam uma linguagem incompreensível e propõem modelos de complexidade muito além do aceitável na prática da manutenção.

Assim, o objetivo principal deste artigo é analisar o tipo de suporte quantitativo que as empresas necessitam para a operacionalização da MCC. Partindo da hipótese de que tanto a literatura como a prática empresarial concentram-se em abordagens qualitativas, este artigo busca identificar o suporte quantitativo necessário à MCC. Para tanto, é elaborada uma revisão de literatura e, posteriormente, são realizadas entrevistas em empresas que executam manutenção. Como resultado final, tem-se a elaboração de um quadro comparativo e um modelo conceitual que associa os métodos quantitativos levantados às atividades da MCC.

Vale ressaltar que o estudo do suporte quantitativo necessário à operacionalização da MCC é importante para que, posteriormente, possam ser desenvolvidos procedimentos que incluam essa abordagem quantitativa na programação da manutenção. Esses procedimentos

podem auxiliar as empresas a reduzir custos de manutenção e a aumentar a disponibilidade e confiabilidade de seus equipamentos.

Este artigo está estruturado em cinco seções. Na seção 2 é apresentado o referencial teórico sobre a utilização de métodos quantitativos na manutenção centrada em confiabilidade. Na seção 3 são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para realizar o trabalho e solucionar o problema de pesquisa. Os resultados obtidos, bem como sua discussão, são apresentados na seção 4. Por fim, na seção 5, são apresentadas as conclusões referentes ao estudo realizado.

REFERENCIAL TEÓRICO

O principal objetivo da MCC é criar uma rotina de manutenção estratégica que preserve funções de sistemas e equipamentos de forma efetiva e com custos aceitáveis (WILMETH; USREY, 2000). Se os custos de uma manutenção preventiva forem maiores que o custo associado às perdas operacionais e ao reparo, a manutenção não é vantajosa (RAO *et al.*, 1996), a menos que se trate de um requisito normativo ou relacionado à segurança ou meio ambiente (BLOOM, 2006).

A base de trabalho de um programa de MCC é a definição das funções e padrões de desempenho dos equipamentos, seguido da descrição de suas possíveis falhas, bem como da análise de suas causas, consequências e da definição de ações que impeçam ou amenizem sua ocorrência (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Neste contexto, adaptações da FMEA são ferramentas amplamente utilizadas na MCC. Rausand (1998) sugere a utilização da *FMECA* (*failure modes, effects and criticality analysis*) para a identificação de modos de falha e definição de sua criticidade. Bloom (2006) apresenta a *COFA* (*consequence of failure analysis*) como uma forma mais acurada e simples de definir as consequências das falhas. Fogliatto e Ribeiro (2009) recomendam a utilização de uma *FMEA* ampliada que contenha também informações pertinentes às atividades de manutenção.

Alguns elementos importantes para entender a MCC são as falhas escondidas e as falhas múltiplas. Falhas escondidas ocorrem quando a falha não é evidente para o operador, sendo que o sistema permanece em funcionamento até a ocorrência de uma segunda falha em outro subconjunto. Falhas múltiplas ocorrem exatamente quando a ocorrência de uma falha está escondida, o que diminui a confiabilidade do sistema e este pode perder sua função a qualquer momento, devido à ocorrência de uma segunda falha. Esses tipos de falhas ocorrem

em sistemas com redundância ou em sistemas que possuem *backups* normalmente inativos (BLOOM, 2006; RAUSAND, 1998).

A otimização da manutenção requer uma combinação balanceada entre os três tipos de manutenção: *i*) preventiva, podendo ser relacionada diretamente com a idade do equipamento ou procura por falhas escondidas; *ii*) preditiva, diretamente relacionada com a condição do equipamento, também é conhecida como preventiva baseada em inspeções; *iii*) corretiva, utilizada em falhas aleatórias e em itens determinados para rodar-até-a-falha (FARRERO *et al.*, 2002; DESHPANDE; MODAK, 2002)

Alguns autores recomendam a utilização de métodos qualitativos para a definição do tipo de manutenção e do intervalo entre manutenções a ser adotado. Deshpande e Modak (2002), Rausand (1998), Bloom (2006), Fogliatto e Ribeiro (2009) e Rao *et al.* (1996) apresentam diagramas de decisão semelhantes para a identificação do tipo de manutenção recomendada. Estes diagramas utilizam informações referentes à evidência da falha, suas consequências e aplicabilidade das atividades de manutenção. Bloom (2006) sugere a utilização da experiência da equipe de manutenção para estabelecer o intervalo entre manutenções, contudo destaca que revisões do plano de manutenção devem ser constantes e baseadas em *feedbacks* relativos às condições da atividade de manutenção.

Visando uma abordagem quantitativa, a definição do tipo de manutenção a ser adotada para cada equipamento depende da densidade de probabilidade característica das falhas deste equipamento. Através da análise de dados de falhas pode-se determinar qual o comportamento das falhas deste equipamento ao longo do tempo e, desta forma, escolher o tipo de manutenção mais adequada (LAFRAIA, 2001; SELLITTO, 2005).

A probabilidade condicional de falhas no tempo depende do tipo de equipamento que está sendo analisado. Algumas destas probabilidades, apresentadas na Figura 1, são: A) a curva da banheira, onde há uma elevada taxa de falha no momento em que o equipamento começa a operar, seguida de uma estabilização onde ocorrem falhas aleatórias e finalizada pelo aumento considerável das falhas devido à fadiga e ao desgaste; B) taxa de falhas constante, com crescimento acentuado no final do período devido à falhas relacionadas à idade, normalmente explica o comportamento de equipamentos mecânicos; C) taxa de falhas levemente crescente com o tempo; D) taxa de falha baixa no início da vida do equipamento, seguida de taxa de falha constante; E) taxa de falha constante durante toda a vida do equipamento, normalmente explica o comportamento de equipamentos eletrônicos; F) taxa de

falha elevada no início da vida do equipamento, com decréscimo acentuado e estabilização das falhas (LAFRAIA, 2001; SELLITTO, 2005).

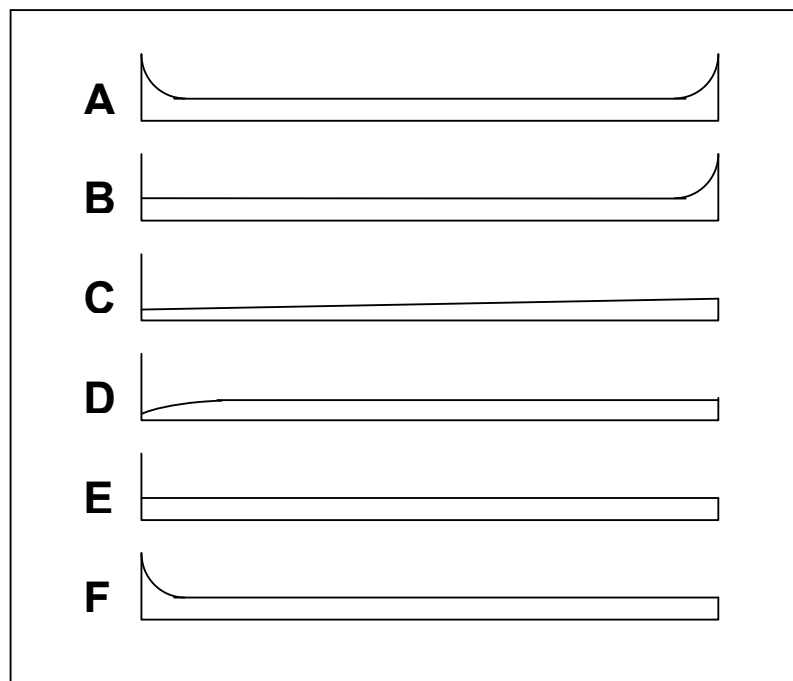


Figura 1 - Tipos de probabilidades condicionais de falhas
Fonte: Moubray (1997)

Para Lafraia (2001), as distribuições dos tempos de falha dos equipamentos devem ditar a política de manutenção do sistema. Caso contrário, a manutenção pode ser ineficaz ou mesmo aumentar a taxa de falha do equipamento. Assim, a definição do tempo entre as manutenções depende de uma descrição matemática do processo de falha do equipamento (RAUSAND, 1998).

Sellitto (2005) sugere a utilização de um método quantitativo para a definição tanto do tipo de manutenção, quanto do intervalo entre manutenções. Após a coleta de tempos até falha e determinação do modelo de distribuição que apresenta o melhor ajuste dos dados, determina-se se a máquina encontra-se na fase de mortalidade infantil, maturidade ou desgaste. Para tanto, são utilizados testes estatísticos de processos aleatórios. Para equipamentos na mortalidade infantil, recomenda-se a adoção de manutenção corretiva emergencial; para equipamentos que se encontram na fase de maturidade, recomendam-se estratégias de manutenção preditiva e corretiva; e, para equipamentos em fase de desgaste, sugere-se a utilização de manutenção preventiva e preditiva.

Baseado em um estudo de caso, Sellitto (2005) também sugere a utilização dos tempos até falha das máquinas para o cálculo de três parâmetros de uma distribuição de *Weibull*. Assim, após definir o grau de significância, é possível calcular o fator de forma γ e, conseqüentemente, determinar se a máquina possui taxa de falha decrescente ($\gamma < 1$ = mortalidade infantil), taxa de falha constante ($\gamma = 1$ = maturidade) ou taxa de falha crescente ($\gamma > 1$ = desgaste). O intervalo de tempo entre manutenções preventivas é obtido considerando as relações de custos entre manutenções corretivas e preventivas.

Para determinar o tipo de manutenção mais apropriado e o intervalo adequado entre manutenções, Farrero *et al.* (2002) apresentam uma abordagem semelhante. Após coletar dados de tempos até falha, determina-se a distribuição de melhor ajuste para estes dados através da utilização dos métodos de papel de probabilidade e estimação de máxima verossimilhança. Após estimar os parâmetros da distribuição, é possível determinar o tempo médio até falha, o tempo de vida médio e o tempo entre inspeções. O tipo de manutenção escolhido deve estar relacionado com o tipo de distribuição das falhas do sistema.

Shankar e Sahani (2003) propõem um complexo método numérico e estatístico que tem por objetivo determinar a quantidade total de manutenção necessária para um dado número de unidades funcionando no tempo. O método pressupõe o uso combinado de conhecimentos de probabilidade e seus modelos de distribuição, custos de manutenção e possibilidades de investimento na manutenção.

Um método quantitativo focado no menor custo anual de manutenção é proposto por Silva *et al.* (2008). Equações diferentes para cada estratégia de manutenção são propostas para o cálculo do custo anual de manutenção. Para tanto, é necessário saber, de antemão, o custo unitário de cada tipo de manutenção, a taxa de falha para cada tipo de manutenção, o tempo anual do equipamento em operação e o número anual de intervenções de manutenção. O estudo revela que o uso combinado de manutenções corretivas, preventivas e preditivas, além de reduzir o custo anual total da manutenção, aumenta os índices de disponibilidade e confiabilidade da planta.

Rao *et al.* (1996) propõem um método para a definição da periodicidade de manutenção com ênfase na máxima disponibilidade dos equipamentos e um custo ótimo de manutenção. Assume-se que os tempos até falha coletados seguem uma distribuição de *Weibull* e estimam-se seus parâmetros. O tempo médio até falha é obtido através de um algoritmo que utiliza como entrada os parâmetros estimados da distribuição *Weibull*. O

intervalo ótimo entre manutenções e o custo de manutenção por unidade do tempo é definido através de outro algoritmo que utiliza como dados de entrada o custo da manutenção preventiva e das paradas e os parâmetros da distribuição de *Weibull*. Os algoritmos são resolvidos utilizando-se softwares de programação computacional.

Zhang e Nakamura (2005) propõem um método para otimizar a programação das manutenções baseado em uma lista dos elementos em ordem decrescente de efeito na manutenção. O efeito dos elementos na manutenção é quantitativamente definido como o aumento da disponibilidade do sistema causado pelo aumento das disponibilidades dos elementos vizinhos com seus intervalos de manutenção. A proposta central do método é o aumento do número de atividades de manutenção em alguns elementos que possuem um grande efeito na produção, a fim de aumentar a disponibilidade do sistema, juntamente com a diminuição do número de atividades de manutenção naqueles elementos que possuem um baixo efeito, com o propósito de reduzir o número total de atividades de manutenção.

Um método quantitativo para a otimização dos níveis de estoque de itens consumíveis derivado de um programa de MCC é proposto por Ferrero *et al.* (2002). Este método baseia-se no conhecimento da taxa de falha do equipamento (λ), do nível de confiabilidade desejado e da escala de tempo que o estoque deve suprir. O estoque necessário é obtido através da multiplicação da taxa de falha pelo tempo de funcionamento do equipamento dentro da escala de tempo total que o estoque deve suprir (H), seguido da identificação na tabela da distribuição de Poisson do valor m correspondente ao nível de confiabilidade desejado e ao valor de $\lambda x H$.

Lafraia (2001) apresenta um método para otimização da frequência de manutenção preventiva baseado na maximização da disponibilidade média e minimização do custo total de manutenção. Supondo que a manutenção preventiva seja perfeita, ou seja, reduz a taxa de falha ao valor inicial, para taxas de falha (λ) linearmente crescente, linearmente decrescente ou constante no tempo, pode-se calcular a disponibilidade média através da taxa de falha média:

$$Dm \cong \frac{1}{1 + \frac{\lambda c m}{\mu c} + \frac{\lambda p}{\mu p}} \quad (\text{eq. 1})$$

O problema é solucionado através da maximização da equação anterior com relação à λp onde:

$$\lambda cm = \frac{1}{1/\lambda p} \int_0^{1/\lambda p} \lambda c(t) dt \quad (\text{eq. 2})$$

Onde Dm é a disponibilidade total, λc é a taxa de falha, μc é a taxa de reparo de manutenção corretiva, λp é a frequência de manutenção preventiva, μp é a taxa de ação de manutenção preventiva e λcm é a taxa de falha média. Igualando a zero a primeira derivada da função Dm em relação a λp tem-se a frequência ótima de manutenção preventiva:

$$\lambda p^* = \sqrt{\frac{\alpha r \mu p}{2 \mu c}} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde αr é o aumento da taxa de falha/ano por ano ou o coeficiente da equação linear da taxa de falha. Para a minimização do custo de manutenção tem-se a seguinte equação para determinar a frequência de manutenção preventiva:

$$\lambda p^* = \sqrt{\frac{\alpha r Cr}{2 Cp}} \quad (\text{eq. 4})$$

Onde Cr é o custo médio de uma manutenção corretiva e Cp é o custo médio de uma manutenção preventiva.

MÉTODO DE TRABALHO

Quanto a sua natureza, esta pesquisa classifica-se como pesquisa aplicada, onde se busca gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Quanto à forma de abordagem do problema, esta pesquisa classifica-se como pesquisa qualitativa. A base da pesquisa qualitativa é a interpretação dos fenômenos e a

atribuição de significados, não requerendo o uso de métodos e técnicas estatísticas (SILVA; MENEZES, 2005).

Do ponto de vista de seus objetivos, esta pesquisa classifica-se como exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito. Envolve levantamento bibliográfico e entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado. Quanto aos seus procedimentos técnicos, esta pesquisa classifica-se como estudo de campo, visto que a pesquisa é desenvolvida por meio da observação direta das atividades do grupo estudado e de entrevistas com informantes para captar suas explicações e interpretações do que ocorre na prática (GIL, 2002).

Este trabalho foi realizado nas seguintes etapas: *i)* Identificar as atividades essenciais da manutenção centrada em confiabilidade (MCC); *ii)* Identificar o suporte quantitativo que a MCC necessita; *iii)* Realizar entrevistas em empresas que executam manutenção, a fim de verificar se utilizam os métodos quantitativos descritos na literatura e, paralelamente, identificar outros métodos quantitativos que sejam necessários, mas que não foram revelados pela literatura; *iv)* Elaborar um quadro comparativo associando métodos quantitativos e atividades da MCC.

Para identificar as atividades essenciais da MCC foi realizada uma revisão da literatura existente, gerando um quadro das atividades essenciais para a operacionalização da MCC. A identificação do suporte quantitativo que a MCC necessita foi obtida através da revisão de literatura e elaboração de quadro resumo dos métodos quantitativos publicados e resultados que eles oferecem.

Na etapa de realização de entrevistas em empresas que executam manutenção, para verificar se utilizam os métodos quantitativos e, paralelamente, identificar outros métodos que possam ser necessários e que não são reportados na literatura, foi empregada a entrevista não-estruturada focalizada. O relato destas entrevistas sumariza as percepções relativas ao MCC de profissionais que atuam na gestão da manutenção.

Para Marconi e Lakatos (2005), na entrevista não-estruturada, o entrevistador tem liberdade para desenvolver cada situação em qualquer direção que considere adequada. Classifica-se como focalizada devido à existência de um roteiro de tópicos relativos ao problema, geralmente em forma de perguntas abertas, sendo que o entrevistador tem liberdade de fazer as perguntas que quiser: sonda razões e motivos, esclarece situações, não obedecendo, a rigor, a uma estrutura formal.

O quadro comparativo associando métodos quantitativos e atividades da MCC foi elaborado através da união dos resultados de atividades e métodos das etapas *i* e *ii*. Este quadro visa associar as principais atividades da MCC aos métodos quantitativos que podem fornecer suporte a essas atividades.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, é preciso estabelecer o conjunto de atividades essenciais para a operacionalização da MCC. Bloom (2006) indica que essas atividades são: definição e treinamento das pessoas que trabalham na manutenção, listagem e classificação de criticidade dos equipamentos conforme suas funções, classificação e análise de falhas funcionais e classificação da abordagem de manutenção (manutenção preventiva, preditiva e corretiva).

Hausand (1998) e Rao *et al.* (1996) identificam como essenciais as seguintes atividades da MCC: classificação dos equipamentos segundo a classificação de suas funções, determinação dos seus padrões de desempenho, classificação e análise de falhas funcionais, classificação do tipo de manutenção a ser aplicada e definição e monitoramento de indicadores (taxa de falhas, tempo médio até falhas, tempo médio de reparo).

Lafraia (2001) e Sellitto (2005) relacionam à MCC atividades mais quantitativas: definição e monitoramento de indicadores (disponibilidade dos equipamentos $A(t)$, confiabilidade $R(t)$, custo da manutenção), análise quantitativa das falhas (risco ou taxa de falha $h(t)$, distribuição de probabilidade das falhas) e programação de manutenção (definição de tarefas e intervalos). Lafraia (2001) e Silva *et al.* (2008) acrescentam o dimensionamento de estoque de peças de manutenção.

Fogliatto e Ribeiro (2009) destacam como questões básicas da MCC: a definição e capacitação da equipe de manutenção, a definição de funções e classificação dos equipamentos e de seus padrões de desempenho, a análise de falhas, a classificação do tipo de manutenção, a seleção das atividades de manutenção e o estabelecimento de indicadores.

Considerando a contribuição dos autores citados, o Quadro 1 apresenta um resumo das atividades que podem ser consideradas essenciais para a operacionalização da MCC.

Quadro 1 - Atividades essenciais da MCC

Atividade	Escopo
1. Definição e capacitação da equipe de manutenção	Contempla a escolha da equipe de manutenção, atribuição de funções e treinamento para que a equipe possa cumprir suas funções.
2. Listagem de equipamentos	Envolve a identificação de todos os equipamentos do setor, devidamente desdobrados em conjuntos e equipamentos.
3. Classificação de funções	Contempla a classificação da função de cada equipamento em função essencial ou função auxiliar. Função essencial é o objetivo principal da instalação do equipamento e função auxiliar é aquela requerida para dar suporte a uma função essencial.
4. Classificação de falhas	Compreende a classificação das falhas em falhas evidentes ou falhas escondidas.
5. Análise de falhas	Envolve a análise do comportamento dos tempos até falha ao longo do tempo dos equipamentos.
6. Classificação de equipamentos	Contempla a classificação dos equipamentos quanto às falhas funcionais em: equipamentos críticos, potencialmente críticos, economicamente significativos e não críticos.
7. Classificação da abordagem de manutenção	Contempla a escolha da abordagem de manutenção mais apropriada (corretiva, preventiva ou preditiva).
8. Programação da manutenção	Envolve o agrupamento de atividades menores em pacotes de manutenção e o planejamento de sua execução em termos de tempo e sequenciamento.
9. Dimensionamento de estoques	Compreende a determinação do tamanho do estoque de cada componente necessário para suprir determinado nível de serviço.
10. Monitoramento de indicadores	Contempla a definição e monitoramento de indicadores do processo de manutenção de equipamentos.

A seguir, é preciso estabelecer os métodos quantitativos que podem facilitar e qualificar a operacionalização das atividades essenciais da MCC (listadas no Quadro 1). Para a análise das falhas é recomendada a utilização dos modelos de probabilidade condicional das falhas, a fim de determinar o comportamento das falhas no tempo, associada a estudos de confiabilidade para identificar o comportamento dos tempos até falha de cada equipamento (LAFRAIA, 2001; SELLITTO, 2005; FARRERO *et al.*, 2002).

A classificação dos equipamentos depende da classificação de suas funções, da classificação de suas falhas e dos resultados da análise de falhas. Normalmente, pode ser resolvida de forma qualitativa com a utilização da *FMEA*, contudo para sistemas mais complexos com vários níveis de redundância pode ser necessária a utilização de diagramas de blocos ou simulação de Monte Carlo (HAUSAND, 1998).

A classificação da abordagem de manutenção necessita o uso de distribuições de probabilidade aplicadas à confiabilidade (SELLITTO, 2005; FARRERO *et al.*, 2002). Isso é necessário para análise prévia das falhas e identificação da distribuição probabilística que melhor ajuste os dados de tempos até falha. Através da determinação dos parâmetros das distribuições de probabilidade, é possível determinar se o equipamento está em fase de falhas prematuras, maturidade ou desgaste. O tipo de manutenção adequado depende da fase em que o equipamento se encontra.

A atividade de programação da manutenção pode ser dividida em duas outras atividades: determinação dos intervalos entre manutenções preventivas e programação da execução das atividades de manutenção. A determinação dos intervalos ótimos entre manutenções preventivas requer o uso de distribuições de probabilidade para a análise dos tempos de bom funcionamento dos equipamentos e equipamentos envolvidos. Os três métodos de cálculo de intervalo ótimo que foram identificados na literatura enfatizam, ainda que de formas diferentes, a máxima disponibilidade do equipamento a um custo ótimo (RAO *et al.*, 1996; ZHANG; NAKAMURA, 2005 e LAFRAIA, 2001).

Para a programação das atividades de manutenção é necessário o agrupamento de atividades menores em pacotes de manutenção que devem ser executados ao mesmo tempo ou numa sequência específica (RAUSAND, 1998). Sistemas de *MRPII* podem ser utilizados para programar os pacotes de atividades, considerando-se que as datas de entrega são os prazos de execução de cada pacote de manutenção e que cada pacote é independente e não possui precedências. Para o sequenciamento das atividades dentro de um pacote de manutenção em uma máquina, pode-se utilizar o método *mean flow time (MFT)*, conforme descrito em Elsayed e Boucher (1994).

O dimensionamento dos estoques de componentes de manutenção pode ser obtido através da utilização de distribuições de probabilidade, juntamente com modelos de gestão de estoques estocásticos ou determinísticos. As distribuições de probabilidade servem para avaliar o comportamento dos tempos até a falha dos componentes e determinar as demandas de peças de reposição e materiais de consumo. Os modelos de gestão de estoques, por sua vez,

podem ser utilizados para determinar o ponto de reposição ou o intervalo de revisão do estoque. Modelos estocásticos que apresentam demanda e *lead time* como variáveis aleatórias independentes no período de análise costumam ser mais eficientes do que modelos determinísticos, porém a escolha do modelo depende das características da organização e dos dados disponíveis. Um método simplificado para otimização de níveis de estoques de itens consumíveis foi apresentado na literatura por Farrero *et al.* (2002).

O monitoramento de indicadores é essencial para medir e verificar o atual desempenho do sistema de manutenção. Geralmente são apresentados na literatura os indicadores de confiabilidade tempo médio entre falhas (*MTBF*), tempo médio entre reparos (*MTTR*) e disponibilidade (*A*). Uma alternativa de medida global do sistema é o indicador de tempo médio entre interrupções (*MTBI*), que considera todos os minutos de interrupção e não apenas o tempo de falha do equipamento (HANSEN, 2006). Também é possível utilizar indicadores de eficiência global (*OEE*) e de produtividade efetiva total (*TEEP*) dos equipamentos. A *OEE* mede a eficácia do processo em fazer bons produtos na velocidade considerada e no tempo que o equipamento está programado para operar, enquanto a *TEEP* mede o percentual do tempo de calendário total que o equipamento opera a uma velocidade ideal, produzindo bons produtos.

A maioria dos autores que discorrem sobre a MCC enfatiza a importância do controle de custos (SILVA *et al.*, 2008; HAUGE, 2002; RAO *et al.*, 1996; WESSELS, 2003; WILMETH; USREY, 2000; ZHANG; NAKAMURA, 2005; LAFRAIA, 2001). Assim, é evidente que sistemas de custeio, como o *ABC (Activity Based Costing)* ou outros, devem ser incluídos entre as técnicas quantitativas que fornecem suporte à operacionalização da MCC.

Complementarmente, para verificar se os métodos quantitativos descritos na literatura eram utilizados na prática pelas equipes de manutenção das empresas, bem como para identificar outros métodos quantitativos que possam ser necessários, foram realizadas entrevistas focalizadas não-estruturadas com os responsáveis pela manutenção em sete empresas dos setores metal-mecânico e eletrônico. Todas são empresas de grande porte, que se destacam em seus mercados específicos. Os principais produtos dessas empresas são: Empresa 1, refrigeradores de ar; Empresa 2, eixos cardans e chassis; Empresa 3, estruturas metálicas; Empresa 4, acessórios para automóveis; Empresa 5, acessórios para caminhões; Empresa 6, componentes elétricos; Empresa 7, aços especiais.

Duas das sete empresas entrevistadas desconhecem os conceitos de MCC, as demais empresas, apesar de conhecer, comentaram que não aplicam esses conceitos devido à alta

complexidade e grande demanda de tempo e pessoal necessários. Normalmente, as empresas utilizam ferramentas como a *FMEA* e a análise de confiabilidade nas atividades do setor de Engenharia de Produtos, contudo esses conceitos não são transmitidos ao setor de Manutenção que desconhece as vantagens da aplicação dessas ferramentas na gestão da manutenção. Por outro lado, os conceitos de Manutenção Produtiva Total (MPT) são amplamente difundidos nas empresas, sendo que todas elas afirmaram conhecer e aplicar na prática algum desses conceitos, destacando-se a manutenção autônoma.

As entrevistas revelaram que seis das sete empresas estudadas não utilizam métodos quantitativos direcionados à MCC. De modo geral, a explicação para a não utilização de tais métodos envolveu a percepção que eles demandariam muito tempo (e, portanto, muito custo) para sua operacionalização. Ainda que possuam históricos de falhas de equipamentos, as empresas se limitam a utilizar apenas métodos qualitativos para a gestão da manutenção, como os conceitos de gestão contemplados na MPT. A elaboração de planos de manutenção normalmente é feita através da utilização dos manuais dos equipamentos associados à experiência dos profissionais da manutenção.

Verificou-se que métodos quantitativos são utilizados somente para o monitoramento de indicadores como: custos da manutenção, disponibilidade, *MTBF* e *MTTR* por equipamento. Porém, é importante ressaltar que em três das sete empresas entrevistadas não existia nenhum indicador definido para monitorar o processo de manutenção. O Quadro 2 apresenta os indicadores utilizados em cada empresa pesquisada.

Quadro 2 - Indicadores utilizados pelas empresas pesquisadas

Indicadores utilizados	Empresas pesquisadas						
	1	2	3	4	5	6	7
Custos da manutenção	•	•	•				•
Disponibilidade (<i>A</i>)	•	•	•				•
<i>MTBF</i>	•	•	•				•
<i>MTTR</i>	•	•	•				•
Confiabilidade (<i>R(t)</i>)			•				

Observou-se que, quanto a sua rotina de manutenção, as empresas estudadas podem ser divididas em dois grupos: aquelas que utilizam indicadores e aquelas que não utilizam indicadores no processo de manutenção.

Em geral, aquelas que utilizam indicadores possuem um plano de manutenções preventivas pré-estabelecido para cada equipamento, sendo que este plano é cumprido de acordo com a disponibilidade da produção para parar a máquina e a disponibilidade de pessoal de manutenção para executar a atividade. Assim, em empresas onde há pouca disponibilidade para parar o equipamento, muitas ocorrências de manutenção corretiva ou pouca mão-de-obra de manutenção, as atividades previstas no plano de manutenção preventiva vão sendo adiadas e acumuladas, formando as chamadas *backorders*. Nessas empresas, os operadores podem solicitar manutenções corretivas e a prioridade das atividades depende da criticidade da falha em termos de segurança e parada de produção. Para aqueles equipamentos críticos (gargalos, com alto *MTTR* ou baixo *MTBF*, críticos com relação à segurança operacional) as falhas são analisadas a fim de determinar e bloquear sua causa.

As empresas que não utilizam indicadores apresentam um nível de desenvolvimento de gestão do processo de manutenção inferior às demais, limitando-se a estabelecer planos de manutenção preventiva que raramente são cumpridos e a executar manutenções corretivas.

No que se refere aos estoques de peças de reposição para a manutenção, constatou-se que, nos casos em que as empresas possuem controle formal, o estoque mínimo ou ponto de reposição é definido com base nos históricos das falhas e na experiência, de forma intuitiva, sem a utilização de métodos específicos de gestão de estoques.

Uma das empresas entrevistadas destaca-se das demais, visto que emprega métodos quantitativos na gestão da manutenção. Nesta empresa, além dos métodos para monitoramento de indicadores comentados anteriormente, são utilizadas distribuições de probabilidade para determinar o comportamento das falhas dos equipamentos e identificar a necessidade de ações corretivas nos equipamentos de menor confiabilidade. Também é utilizado o método de simulação de Monte Carlo visando estimar a capacidade da linha de produção submetida a manutenções corretivas e programadas, bem como para prever a quantidade de manutenções necessárias para o próximo período. Através das tradicionais fórmulas de confiabilidade, são determinadas: a taxa de falhas $h(t)$, a distribuição de probabilidade das falhas $f(t)$ e a confiabilidade $R(t)$ por equipamento e, para os equipamentos críticos, por componente. A operacionalização destes métodos é suportada pela utilização de softwares computacionais estatísticos e de confiabilidade. O responsável pela manutenção ainda destacou o custo do ciclo de vida (*LCC*) como uma técnica da engenharia econômica importante para a determinação e análise dos custos que compõem o custo total de operacionalização do equipamento.

No Quadro 3, são apresentados os resultados da associação das principais atividades da MCC com os métodos quantitativos descritos na literatura e os métodos quantitativos citados por profissionais. Também é apresentada uma breve descrição sobre as contribuições de cada método para a MCC.

Quadro 3 - Quadro comparativo das atividades da MCC e métodos quantitativos

Atividades da MCC	Métodos quantitativos citados na literatura	Métodos quantitativos citados por profissionais	Contribuições dos métodos
Definição e capacitação da equipe de manutenção			
Listagem de equipamentos			
Classificação de funções			
Classificação de falhas			
Análise de falhas	Distribuições de probabilidade	Distribuições de probabilidade	Avaliar a distribuição dos tempos até a falha dos equipamentos
Classificação de equipamentos	Diagrama de blocos e técnicas de análise da confiabilidade de sistemas		Identificar equipamentos críticos Identificar redundâncias
	Simulação de Monte Carlo		Identificar equipamentos críticos
Classificação da abordagem de manutenção	Distribuições de probabilidade	Distribuições de probabilidade	Determinar a fase de vida do equipamento (inicial, maturidade, desgaste) para determinar a abordagem de manutenção mais apropriada
		Métodos de Engenharia Econômica	Determinar o custo do ciclo de vida do equipamento, conforme a abordagem de manutenção escolhida
Programação da manutenção	Distribuições de probabilidade	Distribuições de probabilidade	Estimativa de tempos de falha, tempos de reparo e disponibilidade, para definição de intervalos ótimos de manutenção
		Simulação de Monte Carlo	Estimativa da capacidade da linha de produção submetida a manutenções corretivas e programadas
		Métodos de Engenharia Econômica	Identificar a influência do intervalo de manutenção no custo do ciclo de vida do equipamento Identificar o momento de substituição do equipamento

	<i>MRPII</i> <i>MFT (mean flow time)</i>		Programar os pacotes de atividades no tempo e sequenciar as atividades dentro de um pacote de manutenção em uma máquina
Dimensionamento de estoques	Distribuições de probabilidade		Avaliar a distribuição dos tempos até a falha dos componentes e determinar as demandas de peças de reposição e materiais de consumo
	Modelos estocásticos e determinísticos de gestão de estoques	Modelos estocásticos e determinísticos de gestão de estoques	Determinar o ponto de reposição ou o intervalo de revisão do estoque
Monitoramento de indicadores	Distribuições de probabilidade	Distribuições de probabilidade	Monitorar a distribuição do tempo entre falhas, do tempo para reparo e da disponibilidade dos equipamentos para a tomada de ações
	<i>OEE, TEEP</i>		Medir a eficácia e produtividade do processo produtivo
	Sistemas de custeio	Sistemas de custeio	Monitorar o custo da estratégia de manutenção adotada pela empresa

Na Figura 2 são relacionados de forma simplificada as atividades essenciais da MCC com os métodos quantitativos observados na literatura e na prática empresarial. Observa-se que as “Distribuições de Probabilidade” têm papel fundamental para a MCC, visto que são usadas como suporte em várias de suas principais atividades. Os demais métodos são usados de forma mais localizada, junto a uma ou duas atividades.

Os métodos de Engenharia Econômica e a Simulação de Monte Carlo também merecem destaque, pois cada um deles suporta duas atividades consideradas essenciais no âmbito da MCC. Devido às características desses métodos, eles permitem análises mais sofisticadas associadas ao custo e desempenho de sistemas produtivos sujeitos à manutenção.

Os demais métodos quantitativos, apesar de suportarem diretamente apenas uma atividade essencial, também fornecem contribuição expressiva. O uso de diagrama de blocos e técnicas de análise da confiabilidade de sistemas permite uma visão mais completa dos equipamentos e seus componentes críticos. Os métodos de programação de atividades, *MRPII/MFT (mean flow time)* ou similares, qualificam a alocação de recursos às atividades de manutenção, reduzindo custos e aumentando a produtividade. Os modelos estocásticos e determinísticos de gestão de estoques asseguram o devido dimensionamento das peças de reposição e materiais de consumo, minimizando a probabilidade de falta desses itens. O uso de indicadores específicos da manutenção, como *OEE* e *TEEP*, permite o acompanhamento das variáveis essenciais à produção, como disponibilidade, velocidade e qualidade. Os

sistemas de custeio, como o sistema *ABC*, permitem quantificar com precisão os custos da manutenção e seu impacto sobre os custos globais, revelando que a manutenção, devidamente planejada e dimensionada, reduz os custos globais e aumenta a competitividade da empresa.

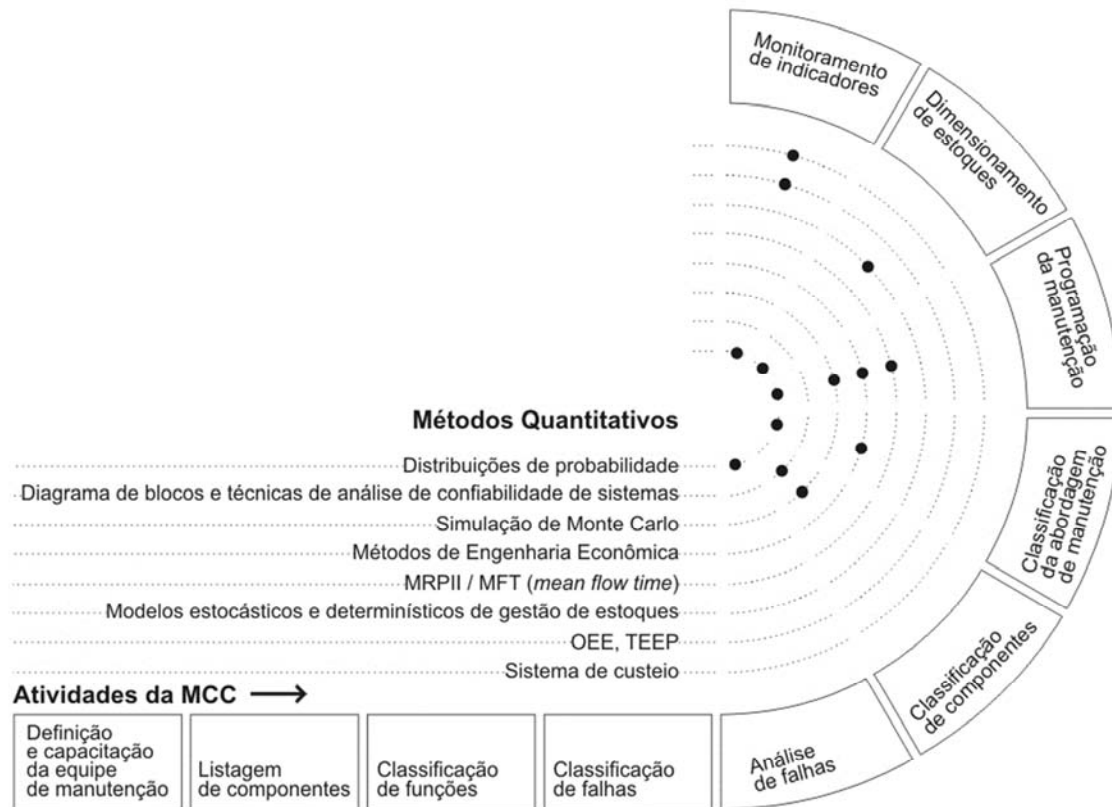


Figura 2 - Atividades da MCC e métodos quantitativos

CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi analisar o tipo de suporte quantitativo que as empresas necessitam para a operacionalização da MCC. Este estudo é importante para que, posteriormente, possam ser desenvolvidos procedimentos que incluam uma abordagem quantitativa na programação da manutenção. Esses procedimentos podem auxiliar as empresas a reduzir custos de manutenção e a aumentar a disponibilidade e confiabilidade de seus equipamentos.

Após a revisão da literatura e identificação das principais atividades da MCC, foram realizadas entrevistas com os responsáveis pela manutenção em sete empresas manufactureiras, a fim de verificar a utilização dos métodos encontrados na literatura e identificar outros métodos. O estudo da literatura indicou que há dez atividades essenciais para a

operacionalização da MCC: definição e capacitação da equipe de manutenção, listagem de equipamentos, classificação de funções, classificação de falhas, análise de falhas, classificação de equipamentos, classificação da abordagem de manutenção, programação da manutenção, dimensionamento de estoques e monitoramento de indicadores.

O estudo da literatura, reforçado por entrevistas junto a profissionais de empresas do setor metal-mecânico, revelou que há oito métodos quantitativos importantes para sustentar a MCC. São eles: distribuições de probabilidade, diagrama de blocos e técnicas de análise de confiabilidade de sistemas, Simulação de Monte Carlo, métodos de Engenharia Econômica, *MRPII/MFT*, modelos estocásticos e determinísticos de gestão de estoques, *OEE/TEEP* e sistemas de custeio.

A modelagem através de distribuições de probabilidade é crucial em muitas atividades da MCC, que não deve ater-se a valores médios, mas entender como tempos até a falha e tempos de reparo se distribuem. Os métodos de Engenharia Econômica qualificam a análise dos custos do ciclo de vida de máquinas e equipamentos. A Simulação de Monte Carlo permite a análise de sistemas reais, de natureza essencialmente estocástica. O uso de diagrama de blocos e técnicas de análise da confiabilidade de sistemas permite uma visão mais completa dos equipamentos e de seus componentes críticos. Os métodos de planejamento e controle da produção, como o *MRPII*, suportam o planejamento ótimo das atividades de manutenção. Os modelos estocásticos e determinísticos de gestão de estoques permitem resolver de forma ótima o conflito entre custos de armazenagem e custos de falta de peças de reposição. O uso de indicadores específicos da manutenção, como *OEE* e *TEEP*, permite o acompanhamento das variáveis essenciais em linhas de produção e o cálculo da eficiência global. Os sistemas de custeio, como o *ABC*, permitem quantificar os custos do sistema produtivo, que incluem as atividades de manutenção.

A análise da contribuição desses métodos revela que eles possuem potencial para fornecer uma contribuição expressiva à operacionalização da MCC. Em conjunto, o uso dos métodos quantitativos listados qualifica o planejamento, melhora o controle das atividades e reduz custos.

Por fim, vale ressaltar as delimitações deste estudo. Este trabalho limitou-se a identificar os métodos quantitativos que podem dar suporte às atividades da MCC. Aprofundamentos relativos à implementação e operacionalização desses métodos no processo de manutenção são sugestões para trabalhos futuros. Além disso, o estudo restringiu-se às sete empresas estudadas, pertencentes aos setores eletrônico e metal-mecânico. Não foram

visitadas empresas de setores de maior risco, como, por exemplo, os setores aeroespacial, nuclear e petroquímico, que, sabidamente, apresentam maior desenvolvimento quanto a aplicações de manutenção e confiabilidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo fornecimento de bolsa de pesquisa. Também agradecemos às empresas entrevistadas, que colaboraram com a disponibilização de informações para este estudo.

REFERÊNCIAS

BLOOM, N. B. *Reliability Centered Maintenance: implementation made simple*. New York, McGraw-Hill, 2006.

DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. Application of RCM to a medium scale industry. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 77, n. 1, p. 31-43, 2002.

ELSAYED, E. A.; BOUCHER, T. O. *Analysis and control of production systems*. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

FARRERO, J. C.; TARRÉS, L. G.; LOSILLA, C. B. Optimization of replacement stocks using a maintenance programme derived from reliability studies of production systems. *Industrial Management & Data Systems*, v. 102, n. 4, p. 188-196, 2002.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Campus - Elsevier, 2009.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

HANSEN, R. C. *Eficiência Global dos Equipamentos: uma poderosa ferramenta de produção/manutenção para aumento dos lucros*. Porto Alegre. Bookman, 2006.

HAUGE, H.S. Optimizing Intervals for Inspection and Failure-Finding Tasks. In: *Reliability and Maintainability Symposium*, 16, 2002. Seattle. Proceedings...

LAFRAIA, J. R. B. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. *Fundamentos de Metodologia Científica*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

MOUBRAY, J. *Reliability-centered maintenance*. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997.

RAO, P. N., SRIKRISHNA, S., YADAVA, G. S. Reliability-centred maintenance applied to power plant auxiliaries. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 2, n. 1, p. 3-14, 1996.

RAUSAND, M. Reliability Centered Maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 60, n. 2, p. 121-132, 1998.

SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. *Revista Produção*, v. 15, n. 1, p. 44-59, 2005.

SHANKAR, G.; SAHANI, V. Reliability analysis of a maintenance network with repair and preventive maintenance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 20, n. 2, p. 268-280, 2003.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4 ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2005.

SILVA, C. M.; CABRITA, C. M.; MATIAS, J. C. Proactive reliability maintenance: a case study concerning maintenance service costs. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v. 14, n. 4, p. 343-355, 2008.

ZHANG, T.; NAKAMURA, M. Reliability-based Optimal Maintenance Scheduling by Considering Maintenance Effect to Reduce Cost. *Quality and Reliability Engineering International*. v. 21, n. 2, p. 203-220, 2005.

WESSELS, W. R. Cost-Optimized Scheduled Maintenance Interval for Reliability-Centered Maintenance. In: *Reliability and Maintainability Symposium*, 17, 2003. Tampa. Proceedings...

WILMETH, G. W., USREY, M. W. Reliability centered maintenance: a case study, *Engineering Management Journal*, v. 12, n. 4, p. 25-31, 2000.

3 SEGUNDO ARTIGO

Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da MCC em um cenário de produção *JIT*

Resumo

Este artigo apresenta um método para desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção *just in time*. O método proposto contempla: *i)* Identificar os conjuntos que influenciam a confiabilidade; *ii)* Levantar taxas de falhas; *iii)* Classificar os conjuntos quanto ao efeito de suas falhas; *iv)* Levantar parâmetros de ocupação da linha; *v)* Identificar as distribuições de probabilidade da ocupação da linha e dos tempos de bom funcionamento e tempos de reparo dos conjuntos; *vi)* Simular a produção/manutenção utilizando o Método de Monte Carlo; *vii)* Realizar uma análise de sensibilidade a eventuais variações na demanda, *MTBF* e *MTTR*; e *iv)* Estabelecer a estratégia de manutenção e intervalos entre manutenções preventivas. A aplicação do método é ilustrada através de um estudo real realizado em uma linha de rotulagem e enchimento de galões de uma empresa do setor de tintas e corantes. A aplicação do método permitiu identificar com clareza os conjuntos e sub-conjuntos críticos frente ao cenário produtivo em questão. Os resultados obtidos auxiliam a empresa na tomada de decisão quanto à necessidade e ao tipo de investimento em manutenção que melhor atenderiam ao cenário de demanda projetado.

Palavras-chave: manutenção centrada em confiabilidade, simulação de Monte Carlo, sistema *Just in time*, plano de manutenção.

Abstract

This paper presents a method to develop quantitative analysis to support the review or preparation of an equipment maintenance plan in a Just in time production scenario. The proposed method includes: *i)* Identification of parts that influence reliability; *ii)* Estimation of failure rates; *iii)* Classification of parts according the effect of their failures; *iv)* Estimation of line occupation parameters; *v)* Identification of probability distributions for occupation line, time between failures and repair times, *vi)* Simulation of production and maintenance using the Monte Carlo Method; *vii)* Accomplishment of a sensitivity analysis concerning variations

in demand, *MTBF* and *MTTR*, and *iv*) Establishment of maintenance strategy and intervals between preventive maintenance. The method is illustrated through an application comprising the scenario of a labeling and filling gallons line at a paints and dyes production company. The method allowed to clearly identifying the critical parts according the productive scenario in question. The results help companies in decision making regarding the necessity and type of investment in maintenance that would best attend the projected demand scenario.

Key-words: reliability centered maintenance, Monte Carlo simulation, Just in time system, maintenance plan.

INTRODUÇÃO

O cenário atual, economicamente globalizado e altamente competitivo, exige que as empresas visualizem a manutenção como uma função estratégica para aumentar a produtividade. Visto que a produtividade está diretamente relacionada à redução dos custos e pode propiciar aumento de faturamento, melhorias na confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos produtivos podem contribuir significativamente para aumentar a competitividade das organizações (SANTOS *et al.*, 2007; MÁRQUEZ *et al.*, 2009).

Um dos paradigmas da manutenção é o conceito que todas as falhas são prejudiciais e devem ser prevenidas ou que o aumento das atividades de manutenção em um item aumenta, necessariamente, a sua confiabilidade. Porém, tecnicamente, muitas falhas não podem ser antecipadas e, mesmo se pudessem ser prevenidas, os custos da manutenção seriam proibitivos (RAUSAND, 1998; DESHPAND; MODAK, 2002). Além disso, em equipamentos com comportamento aleatório de falhas ou em fase de falhas prematuras, a execução de manutenção não é eficaz, podendo, inclusive, introduzir defeitos no equipamento (LAFRAIA, 2001). Por outro lado, negligenciar a manutenção pode trazer consequências catastróficas para a segurança, o meio ambiente e a produtividade da empresa (BLOOM, 2006).

Tradicionalmente, a manutenção é planejada utilizando a experiência dos funcionários envolvidos e a orientação contida nos manuais dos fabricantes dos equipamentos (LAFRAIA, 2001; RAUSAND, 1998). Sabe-se que grande parte dos funcionários acredita na premissa de que as falhas ocorrem devido ao desgaste no tempo (WILMETH; USREY, 2000). Contudo, estudos feitos na aviação determinaram que apenas 11% dos componentes falham devido a desgaste e fadiga (LAFRAIA, 2001; WILMETH; USREY, 2000). Paralelamente, no que concerne às orientações contidas nos manuais dos fabricantes, corre-se o risco dessas

recomendações não serem baseadas em dados reais, pois alguns fabricantes de equipamentos, a fim de maximizar vendas de componentes ou minimizar sua responsabilidade, orientam intervalos curtos de revisão e substituição (LAFRAIA, 2001; RAUSAND, 1998).

Para Ferrero *et al.* (2002), a otimização da política de manutenção requer uma combinação balanceada entre manutenções preventivas, preditivas e corretivas. A determinação do tipo de manutenção e do intervalo entre manutenções de cada equipamento depende do comportamento de sua taxa de falhas e do custo associado. Assim, a utilização de dados quantitativos tem grande importância na elaboração de planos de manutenção mais eficazes (RAUSAND, 1998; FARRERO *et al.* 2002; NGUYEN *et al.* 2008; SELLITTO, 2005; LAFRAIA, 2001).

Atualmente, o grande desafio para o planejamento da manutenção é exatamente a definição de quando e que tipo de intervenção deve ser feita em determinado equipamento. Apesar de existir farto material sobre confiabilidade de produtos, na perspectiva dos fabricantes, a discussão da aplicação da confiabilidade em itens em operação, na perspectiva da manutenção, ainda é escassa na literatura (SANTOS *et al.*, 2007).

Rao *et al.* (1996) justificam que abordagens qualitativas têm sido preferidas às abordagens quantitativas devido à falta de dados históricos nas plantas e de métodos estatísticos adequados para interpretar esses dados. Rausand (1998) complementa afirmando que os artigos sobre otimização da manutenção são escritos por pesquisadores matemáticos ou estatísticos que utilizam uma linguagem incompreensível e propõem modelos de complexidade muito além do aceitável na prática da manutenção.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção *just in time*. Cenários *just in time (JIT)* se caracterizam por estoques reduzidos (ou nulos) e a necessidade de atender a programação da produção no próprio turno de trabalho. Assim, nesses cenários, o que está programado para o dia d deve ser entregue no dia d e não deve ser postergado para $d+1$.

Cenários *just in time* têm sido largamente aplicados com o objetivo de reduzir custos de estoques de matérias-primas, produtos semi-acabados e produtos acabados. Contudo, o bom desempenho desse tipo de sistema requer, além da eliminação de itens defeituosos fluindo no processo, uma produção equilibrada ao longo do tempo. Essas premissas só podem ser alcançadas através de uma manutenção eficiente, que elimine a ocorrência de defeitos

gerados pelo processo nos produtos e que evite a ocorrência de falhas inesperadas nos equipamentos, a fim de manter um fluxo estável de produtos no processo.

A utilização do método de Simulação de Monte Carlo para modelar a produção/manutenção em cenários de produção *just in time* permite a inclusão da variabilidade, natural do sistema, na simulação. Essa simulação possibilita a análise da resposta do sistema quanto às horas de parada de máquina e horas-extras para atender a demanda diária, considerando possíveis variações de demanda, MTBF e MTTR. Estes resultados auxiliam a empresa na tomada de decisão quanto à necessidade e ao tipo de investimento em manutenção que melhor atenderiam ao cenário de demanda projetado.

A elaboração de planos de manutenção baseados em análises quantitativas é essencial para a compreensão do tipo e do intervalo de manutenção mais adequado ao comportamento da taxa de falhas de cada equipamento. Assim, é possível definir a melhor estratégia de manutenção para cada equipamento, evitando a aplicação de atividades de manutenção desnecessárias ou ineficazes e agregando atividades que efetivamente contribuem para o aumento da disponibilidade dos equipamentos e redução de custos da empresa. Vale ressaltar que questões qualitativas, como condições de acesso aos equipamentos, recomendações apresentadas em normas e regulamentos, treinamento do pessoal de manutenção e outras atividades programadas para o mesmo equipamento, também devem ser consideradas.

Este artigo está estruturado em cinco seções. Na seção 2 é apresentado o referencial teórico sobre os métodos de elaboração de planos de manutenção e seus elementos. Na seção 3 são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para realizar o trabalho e solucionar o problema de pesquisa. Os resultados obtidos, bem como sua discussão são apresentados na seção 4. Por fim, na seção 5, são apresentadas as conclusões referentes ao estudo realizado.

REFERENCIAL TEÓRICO

A literatura indica que os principais elementos a serem definidos em um plano de manutenção para um equipamento são: *i)* a estratégia de manutenção para cada sistema ou equipamento e *ii)* o intervalo de tempo entre manutenções (BLOOM, 2006; RAUSAND, 1998; SELLITTO, 2005).

A escolha da melhor estratégia de manutenção envolve, além da identificação do comportamento da taxa de falhas do equipamento no decorrer do tempo, a verificação das

atividades de manutenção aplicáveis e a criticidade da falha, considerando aspectos associados à economia, segurança e meio ambiente (BLOOM, 2006; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; NGUYEN *et al.* 2008).

Uma boa estratégia de manutenção é a manutenção preditiva, contudo, se seus custos são proibitivos ou se um método para monitoramento da condição do equipamento ainda não foi desenvolvido, é indicada a manutenção preventiva. Se a manutenção preventiva não é aplicável, deve-se analisar se a falha pode ser tolerada. Se a falha não pode ser tolerada, é necessário um *redesign* do equipamento, se ela é tolerável, deve-se aplicar a manutenção corretiva e adotar procedimentos de procura por falhas, buscando identificar falhas escondidas (WILMETH; URSEY, 2000; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Com base em dados qualitativos das falhas dos equipamentos, diversos autores apresentam diagramas de decisão para a determinação da melhor estratégia de manutenção (BLOOM, 2006; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; RAUSAND, 1998; RAO *et al.*, 1996; DESHPANDE; MODAK, 2002). Estes diagramas relacionam informações relativas à evidência da falha, suas consequências, previsão de desgaste do equipamento no tempo e aplicabilidade da manutenção.

Bevilacqua *et al.* (2000) propõem uma metodologia baseada na integração entre FMECA modificada e Simulação de Monte Carlo para determinar o tipo de manutenção mais apropriado para cada equipamento. O número de prioridade de risco (*RPN*) é definido através da soma do produto de pesos de seis parâmetros (segurança, importância da máquina para o processo, custos de manutenção, frequência de falhas, tempo de reparo e condições de operação) pelo desempenho da máquina nesses parâmetros. Os pesos estipulados para cada parâmetro são analisados quanto a sua robustez através da Simulação de Monte Carlo. As máquinas são distribuídas em três grupos: Grupo 1, para os equipamentos onde as falhas podem gerar sérias consequências em termos de segurança, danos ambientais e materiais e perdas de produção, é recomendada a aplicação de manutenção preditiva; Grupo 2, para os equipamentos onde as falhas podem gerar sérios danos, porém não afetam a segurança de pessoas e o meio ambiente, é recomendada a utilização de manutenção preventiva; Grupo 3, para os equipamentos onde as falhas não são relevantes, recomenda-se a aplicação de manutenções apenas corretivas.

Sellitto (2005) e Lafraia (2001) definem a melhor estratégia de manutenção com base em dados estatísticos das falhas dos equipamentos. Através da determinação dos parâmetros da distribuição de *Weibull*, obtida através do ajuste dos dados de falhas, é possível identificar

se o equipamento encontra-se no período de falhas prematuras (parâmetro de forma < 1), maturidade (falhas aleatórias, parâmetro de forma = 1) ou desgaste (parâmetro de forma > 1). As estratégias de manutenção aconselhadas são: *i*) fase de falhas prematuras – manutenção corretiva; *ii*) fase de maturidade – manutenção preditiva e gestão de boas práticas de manutenção; *iii*) fase de desgaste – manutenção preventiva.

Para a determinação do intervalo de tempo entre manutenções, Bloom (2006) recomenda a utilização da experiência e do bom senso, visto que, além do histórico de falhas, é necessário considerar fatores como: recomendação dos fabricantes, orientação de normas e regulamentos, paradas programadas, condições de acesso ao equipamento e outras atividades de manutenção programadas para o mesmo equipamento. O autor ainda destaca a necessidade de revisões nos intervalos de manutenção. Estas devem ser baseadas no *feedback* constante dos operadores da manutenção quanto à condição do equipamento no momento da execução da atividade.

Rao *et al.* (1996) apresenta um algoritmo para a otimização do intervalo entre manutenções baseado no menor custo total de manutenções preventivas e corretivas. Santos *et al.* (2007) propõem um modelo para determinação do tempo ótimo entre manutenções preventivas também baseado no custo ótimo de manutenção, porém utilizando o processo de Poisson Homogêneo e Não-Homogêneo.

Sellitto (2005) e Lafraia (2001) obtêm o intervalo ótimo de intervenção através das relações de custo entre intervenções de emergência e preventiva (R_{EP}). Lafraia (2001) ainda apresenta um método para determinação do intervalo ótimo de intervenção baseado na maximização da disponibilidade média do equipamento. Supondo que a manutenção preventiva seja perfeita, recuperando a taxa de falha ao seu valor inicial, para taxas de falha (λ) linearmente crescente, linearmente decrescente ou constante no tempo, o autor demonstra que a frequência ótima de manutenção preventiva pode ser obtida pela equação 1:

$$\lambda p^* = \sqrt{\frac{\alpha r \mu p}{2\mu c}} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde αr é o aumento da taxa de falha por ano ou o coeficiente da equação linear da taxa de falha, μp é a taxa de ação de manutenção preventiva, μc é a taxa de reparo de manutenção corretiva.

Em resumo, as análises quantitativas que podem dar suporte ao planejamento da manutenção, no âmbito da MCC, seriam: para a definição da estratégia de manutenção mais

adequada, a análise estatística do comportamento da taxa de falhas do sistema, FMECA modificada e Simulação de Monte Carlo; para a determinação do melhor intervalo entre manutenções, têm-se análises do custo ótimo de manutenção e maximização da disponibilidade do sistema.

MÉTODO DE TRABALHO

Quanto a sua natureza, esta pesquisa classifica-se como pesquisa aplicada, onde se objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Quanto à forma de abordagem do problema, esta pesquisa classifica-se como pesquisa quantitativa. A pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-los e analisá-los (SILVA; MENEZES, 2005).

Do ponto de vista de seus objetivos, esta pesquisa classifica-se como exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito. Envolve levantamento bibliográfico e estudo de exemplos que estimulam a compreensão do problema pesquisado. Quanto aos seus procedimentos técnicos, esta pesquisa classifica-se como pesquisa-ação. A pesquisa-ação é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo (GIL, 1991).

Este trabalho foi realizado nas seguintes etapas: *i)* Identificação dos conjuntos ou subconjuntos que influenciam a confiabilidade dos equipamentos a serem estudados; *ii)* Levantamento das taxas de falhas dos conjuntos ou subconjuntos identificados; *iii)* Classificação dos conjuntos ou subconjuntos quanto ao efeito de suas falhas (tempos de reparo, tempos de bom funcionamento e disponibilidade); *iv)* Levantamento dos parâmetros de ocupação da linha; *v)* Identificação das distribuições de probabilidade da ocupação da linha, dos tempos de bom funcionamento e dos tempos de reparo dos subconjuntos; *vi)* Simulação da produção/manutenção a fim de definir, através de métodos estocásticos, a probabilidade de que a linha não atenda a demanda diária de produção; *vii)* Realização de uma análise de sensibilidade das horas-extras e tempos de parada de máquinas a eventuais variações na demanda, *MTBF* e *MTTR*; e *iv)* Estabelecimento da estratégia de manutenção e intervalos entre manutenções preventivas.

O método idealizado foi aplicado na filial gaúcha de uma empresa multinacional do setor de tintas e corantes. Escolheu-se a linha de rotulagem e enchimento de galões, chamada *Packer*, devido a sua criticidade em termos de ocupação e número de chamados de manutenção. A equipe da manutenção da empresa, juntamente com a equipe de operação da linha, identificou os sistemas e conjuntos significativos a serem analisados. Foram identificados seis conjuntos e dezessete subconjuntos.

O levantamento das taxas de falha foi feito através da coleta de dados de manutenção existentes nas Ordens de Serviço da empresa dos anos de 2008 e 2009 (descrição da falha, tempo de reparo e data de ocorrência). Os dados foram organizados e revisados pela equipe de manutenção, pois muitas Ordens de Serviço não apresentavam descrições claras e relevantes sobre o serviço de manutenção executado. Foram identificados os modos de falha e o conjunto e subconjunto referente a cada falha.

Na sequência, foram identificadas as possíveis causas e consequências de cada falha e foram calculados os tempos médios de reparo (*MTTR*), tempos médios de bom funcionamento (*MTBF*) e a disponibilidade de cada subconjunto. Para os subconjuntos que não apresentavam registro da ocorrência de nenhuma falha em todo o período analisado, foi considerada disponibilidade = 1,0.

Para verificar o modelo de distribuição de probabilidade que melhor se ajustava aos dados de tempos de bom funcionamento de cada subconjunto foram realizados testes estatísticos no software PROCONF. O modelo de distribuição de *Weibull* mostrou-se adequado para todos os subconjuntos, sendo que os parâmetros de forma sempre resultaram próximo de 1,0. Sendo assim, optou-se pela distribuição exponencial para modelar os subconjuntos (a distribuição exponencial é um caso particular da distribuição de *Weibull* onde a taxa de falha é constante e o parâmetro de forma é igual a 1,0). Vale observar que a taxa de falha constante é esperada para esses subconjuntos, uma vez que, conforme o relato das equipes de operação e manutenção, eles se encontram na fase de maturidade (fase intermediária da tradicional curva da banheira, onde a taxa de falha é aproximadamente constante). Os intervalos iniciais foram definidos com base na tolerância da empresa quanto à probabilidade de que a falha ocorra no subconjunto antes da execução da manutenção.

Quanto aos tempos de reparo, o mesmo comportamento foi observado. Os tempos de reparo dos subconjuntos seguem aproximadamente a distribuição exponencial e a mesma foi selecionada para representá-los. Esta constatação está de acordo com premissas apresentadas por Sellitto (2005) e Lafraia (2001), segundo a qual reparos em equipamentos industriais com

atividades com componente intelectual e cognitivo podem seguir as características desta distribuição. Segundo Sellitto (2005), em tempos para reparo, também é possível encontrar a distribuição normal, quando o reparo for uma soma de tarefas independentes e sequenciais, tal como ocorre em reformas de máquinas e em procedimentos preventivos mais complexos e intrincados, o que não reflete o caso em estudo.

Na etapa seguinte, foram coletados dados de ocupação da linha, referentes às horas de operação diária e mensal, no período de janeiro de 2009 a julho de 2010. Baseado nesses dados, foi possível ajustar uma distribuição de probabilidade ao número de horas de trabalho por dia. Uma distribuição normal, com média 12 horas por dia e desvio-padrão de 1,5 horas por dia apresentou um ajuste adequado aos dados.

Após a definição das distribuições de probabilidade apropriadas para modelar os tempos de bom funcionamento, os tempos de reparo e a ocupação da linha, foi desenvolvido um estudo de simulação de Monte Carlo das atividades de produção, falhas e manutenção. Essa simulação permitiu estudar, através de métodos estocásticos, a probabilidade da linha atender a demanda diária de produção. A simulação envolveu a determinação da ocupação diária da linha, com base nos dados de ocupação, a identificação da ocorrência da falha, com base nos tempos de bom funcionamento e a definição dos tempos de reparo, utilizando-se a distribuição dos mesmos.

A simulação permitiu verificar a probabilidade de que a linha não atenda a demanda diária de produção, devido ao possível desequilíbrio entre as horas de trabalho demandadas e as horas disponíveis, que podem ser reduzidas em função de falhas e respectivos reparos. Vale observar que, sempre que as horas demandadas de trabalho superarem as horas disponíveis, a política de produção, em função do cenário *JIT*, exige horas extras. O cenário *JIT* vivenciado pela empresa impõe que a demanda diária deve ser atendida no respectivo dia.

Posteriormente foi realizada uma análise de sensibilidade das horas-extras e horas de parada de máquina da linha a variações na demanda, tempos de bom funcionamento e tempos de reparo. Foram gerados gráficos, representando cenários onde foram variados a demanda, o *MTBF* e o *MTTR*, permitindo a visualização do impacto dessas variáveis sobre as horas-extras.

Por fim, após verificar, no estudo de simulação, a necessidade de melhorias na manutenção para aumento da disponibilidade do equipamento devido à previsão de aumento da demanda, foi estabelecida uma nova estratégia de manutenção e foram revistos os

intervalos entre manutenções preventivas. Estes novos intervalos estão de acordo com a confiabilidade desejada pela empresa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a classificação em conjuntos e subconjuntos e o levantamento dos respectivos tempos de bom funcionamento e tempos de reparo, foi possível calcular o tempo médio de reparo, o tempo médio de bom funcionamento e a disponibilidade de cada subconjunto, conforme apresentado na Tabela 1. Para os três subconjuntos que não apresentaram nenhuma falha no período analisado foi considerada disponibilidade igual a 1,0. Nas figuras 1, 2 e 3 são apresentados gráficos do *MTBF*, *MTTR* e Disponibilidade dos subconjuntos, respectivamente.

TABELA 1 - Conjuntos e subconjuntos do sistema

Conjunto	Cj	Subconjunto	Scj	MTTR (h)	MTBF (dias)	Disponibilidade
Carrossel de rotulagem	A	Sistema motriz A	2	3,389	57,375	0,9971
	A	Embreagem do posicionador	3	Não possui registro de falhas		1,0000
	A	Sensores de posicionamento	4	3,532	11,323	0,9846
Esteira transportadora	B	Sistema motriz B (motor, redutor e acionamento elétrico)	5	Não possui registro de falhas		1,0000
	B	Polias, mancais, esteiras e guias	6	4,106	23,318	0,9913
	B	Sistema de controle aplicação, enchimento e fechamento	7	2,153	34,000	0,9968
Carrossel de Enchimento	C	Junta rotativa superior	10	16,350	62,250	0,9870
	C	Bicos de enchimento	11	4,178	96,450	0,9978
	C	Balanças /Módulos de pesagem	12	5,859	35,297	0,9918
	C	Escovas de orientação	13	5,251	31,375	0,9917
	C	Junta rotativa inferior	17	Não possui registro de falhas		1,0000
	C	Sistema de lavagem	18	5,011	94,950	0,9974
	C	Sistema motriz C	19	3,000	98,625	0,9985
Largador e fechador de Tampas	D	Largador de tampas	14	4,987	26,063	0,9905
	D	Fechador de tampas	15	8,138	83,500	0,9952
Quadros de Comando	E	Quadros de comando	21	1,617	21,750	0,9963
Sistema etiquetadora	F	Etiquetadora	20	3,419	19,442	0,9913

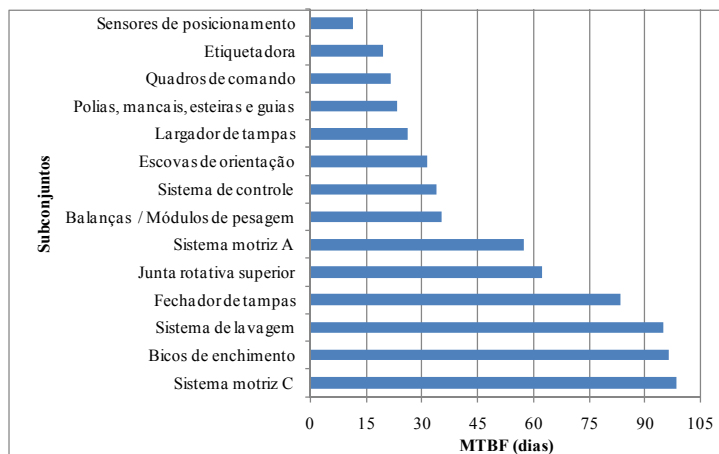


Figura 1 - *MTBF* em dias dos subconjuntos

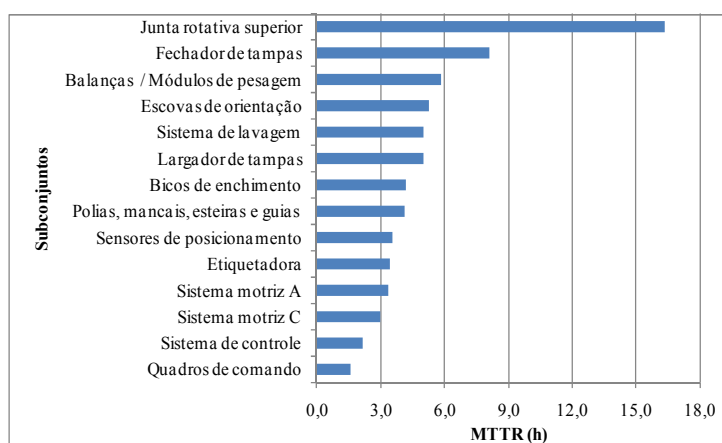


Figura 2 - *MTTR* em horas dos subconjuntos

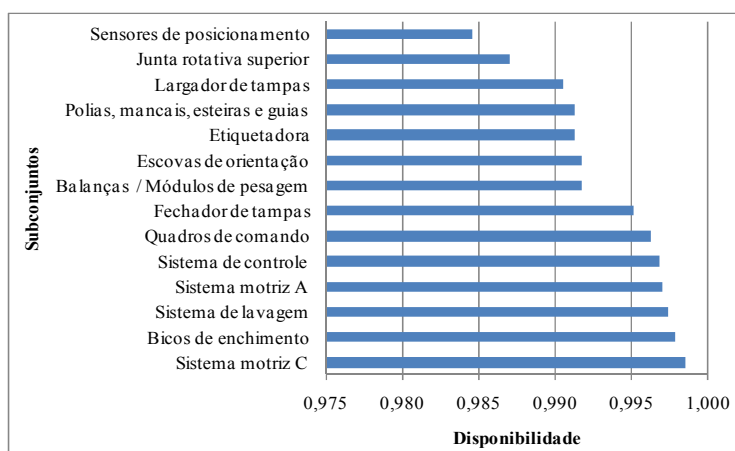


Figura 3 - Disponibilidade dos subconjuntos

A Figura 3 mostra que os Sensores de posicionamento do Carrossel de rotulagem é o subconjunto que apresenta menor disponibilidade (0,9846). Este fato se deve, como pode ser observado na Figura 1, ao pequeno tempo médio de bom funcionamento (*MTBF*). Em média, a cada 11 dias ocorre uma intervenção de manutenção nesse subconjunto. Por outro lado, a

Junta rotativa superior, que aparece na Figura 3 como o subconjunto com o segundo menor índice de disponibilidade (0,9870), apresenta um tempo médio para reparo (*MTTR*) significativamente elevado com relação aos demais subconjuntos, sendo superior a dezesseis horas, conforme Figura 2. Desta forma, observa-se serem necessárias ações para reduzir o número de ocorrências de falhas nos Sensores de posicionamento e melhorar a rotina de manutenção da Junta rotativa superior, a fim de aumentar a disponibilidade dos mesmos e, conseqüentemente, a disponibilidade da linha.

Após identificar o modelo de distribuição exponencial como aquele que melhor se ajusta aos dados de tempos de bom funcionamento e tempos de reparo dos subconjuntos, calculou-se, através do inverso do *MTBF*, a taxa de falha de cada subconjunto. É importante ressaltar que a maturidade, com taxa de falha constante, é resultado das boas práticas de manutenção empregadas nesses equipamentos e não das suas vidas úteis, sendo que, neste caso, a estratégia de manutenções preventivas é recomendada.

A simulação da produção, falhas e manutenção foi realizada seguindo os princípios do Método de Monte Carlo. Para basear a análise em uma amostra suficientemente grande, foram simulados 1290 dias, que equivalem a cinco anos de trabalho.

A simulação dividiu-se em três etapas: *i*) inicialmente foram gerados dados de ocupação diária da linha, através de uma previsão de demanda média de produção pré-determinada; *ii*) a seguir, baseando-se na taxa de falha e respectiva distribuição de probabilidade de falha, foram gerados dados diários de sucesso ou falha para cada subconjunto; *iii*) por fim, para os subconjuntos que falharam em cada dia simulado, foram gerados tempos de reparo, utilizando-se as respectivas distribuições dos tempos de reparo dos subconjuntos.

Assim, as variáveis de controle ou de entrada para a simulação são a demanda média, prevista em horas por dia, o *MTBF* e o *MTTR* em horas para o sistema. Como resultados da simulação têm-se a estimativa de horas de máquina parada por mês e a estimativa de horas-extras necessárias para atender a demanda mensal. Caso a soma das horas de ocupação e horas de reparo de determinado dia seja superior a dezessete horas (horas regulares trabalhadas diariamente), haverá a necessidade de horas-extras, caso contrário a demanda será suprida durante o horário normal de trabalho. A Figura 4 apresenta resumidamente a planilha de simulação.

A simulação permite estimar a quantidade de horas-extras que seriam necessárias para suprir determinada demanda diária a partir de valores pré-estabelecidos de *MTBF* e *MTTR* do sistema. O Método de Monte Carlo possibilita a inclusão da variabilidade, inerente às variáveis estocásticas, na simulação, o que gera resultados mais próximos da realidade do sistema em estudo.

Variáveis de controle		Subconjuntos	Sensores de posicionamento	Etiquetadora	Quadros de comando	Polias, mancais, esteiras	Largador de tampas	Escovas de orientação	Sistema de controle	Balanças/Modulos de pesagem	Sistema motriz A	Junta rotativa superior	Fechador de tampas	Sistema de lavagem	Bicos de enchimento	Sistema motriz C
MTBF relativo	1	MTBF	11,3	19,4	21,8	23,3	26,1	31,4	34,0	35,3	57,4	62,3	83,5	95,0	96,5	98,6
MTTR relativo	1	MTTR	3,5	3,4	1,6	4,1	5,0	5,3	2,2	5,9	3,4	16,4	8,1	5,0	4,2	3,0
Demanda(h/dia)	12															

RESULTADOS	Ocupação		Falhas e TTRs														RESULTADOS		
	Dia	Ocupação (h)	Sensores de posicionamento	Etiquetadora	Quadros de comando	Polias, mancais, esteiras	Largador de tampas	Escovas de orientação	Sistema de controle	Balanças/Modulos de pesagem	Sistema motriz A	Junta rotativa superior	Fechador de tampas	Sistema de lavagem	Bicos de enchimento	Sistema motriz C	Tempo de reparo	Parada de linha	Horas Extras
1	10,9																		
Horas Extras Mensais	2	11,9						13,3									13,3	13,3	8,224
17,05 h/mês	3	12,2																	
4	11,9																		
Parada de Máquina	5	10,9																	
40,65 h/mês	6	12,8																	
7	12,9																		
8	12,3																		
9	12,8			4,6													4,6	4,6	0,404
10	10,9					4,9		0,2									5,1	5,1	...
...
1281	11,9							0,6									0,6	0,6	...
1282	13,7																		
1283	11,7																		
1284	13,2																		
1285	12,9				1,6												1,6	1,6	
1286	14,5							3,9									3,9	3,9	1
1287	11,6																		
1288	11,2																		
1289	12,2																		
1290	11,6												1,2				1,2	1,2	

Figura 4 – Resumo da planilha de simulação

A fim de facilitar a visualização dos resultados gerados pela simulação, foi realizada uma análise de sensibilidade das horas-extras e horas de parada de máquina a variações na demanda, *MTBF* e *MTTR*. Foram gerados vários cenários com variações de demanda, *MTBF* e *MTTR*, os quais são apresentados na Figura 5. Cada gráfico corresponde à simulação de um valor de *MTTR*, sendo que cada curva no gráfico representa um valor de *MTBF*. Cada ponto em cada gráfico ilustra a necessidade de horas-extras para um cenário gerado pela combinação de valores de demanda, *MTBF* e *MTTR*.

Vale observar que a resposta a variações na demanda era o interesse principal da empresa em estudo, uma vez que, em função do cenário econômico, a gerência prevê que a demanda deve crescer no próximo ano. Variações no *MTBF* seriam resultado de alterações na

política atual de manutenção preventiva e preditiva. Por exemplo, intensificar as atividades de manutenção preditiva e preventiva tipicamente irá resultar em um aumento no *MTBF*. Variações no *MTTR* seriam resultado de alterações na capacitação e recursos da equipe de manutenção. Por exemplo, reforço na capacitação da equipe de manutenção e melhorias nas ferramentas e estoque de peças de reposição tipicamente irá resultar em uma redução no *MTTR*.

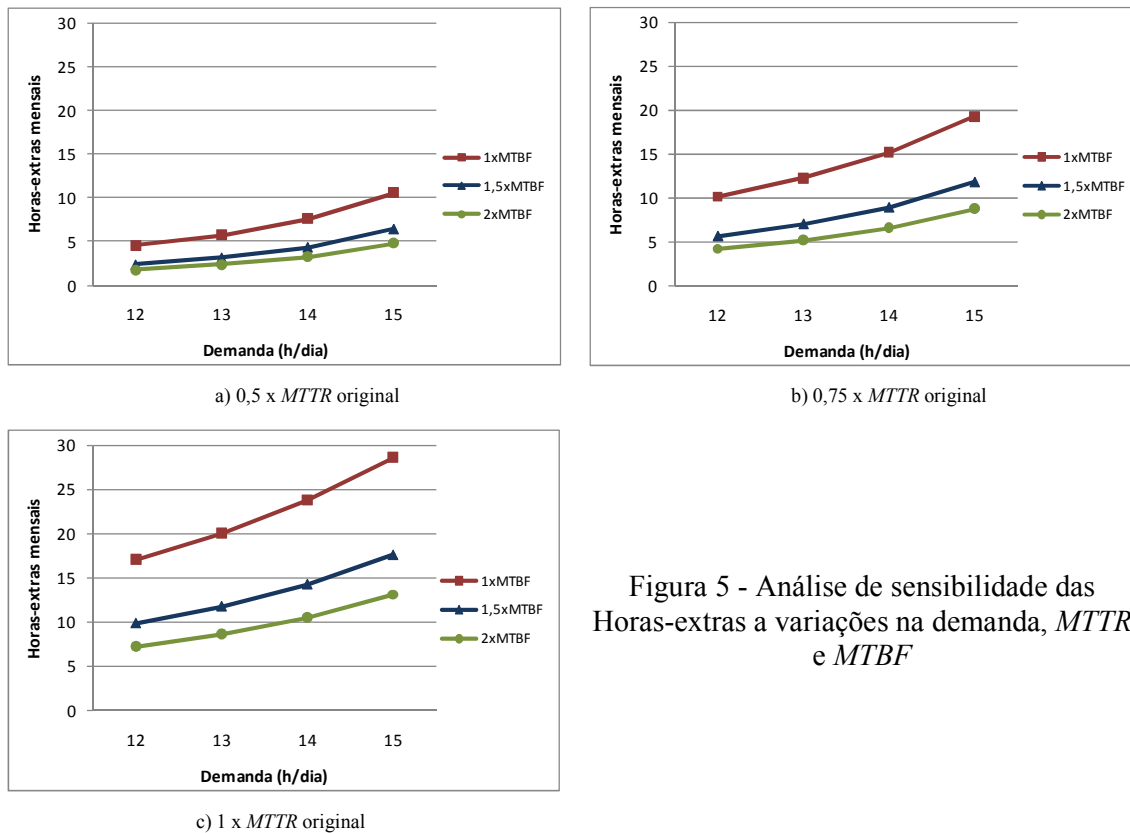


Figura 5 - Análise de sensibilidade das Horas-extras a variações na demanda, *MTTR* e *MTBF*

Os gráficos apresentados demonstram que, à medida que a demanda cresce, a quantidade de horas-extras necessárias também aumenta. Ainda que a demanda média seja inferior à capacidade produtiva disponível, em casos onde ela é próxima ao valor da capacidade produtiva, o seu perfil estocástico produz dias de demanda superior à capacidade, o que gera a necessidade de horas-extras. Tal fato é agravado quando há ocorrência de falhas que necessitam reparos emergenciais e causam interrupção da produção.

Os gráficos também permitem visualizar o comportamento da necessidade de horas-extras variando-se o *MTBF* e o *MTTR*. Quanto maior é o *MTBF*, menor é o número de falhas do sistema, e, conseqüentemente, menor é o tempo gasto em atividades de reparo, o que permite que a capacidade produtiva seja melhor aproveitada. Do mesmo modo, quanto menor

for o *MTTR*, menor será o tempo gasto em manutenções corretivas, o que aumenta a disponibilidade do sistema.

Ainda que *MTBF* e *MTTR* possuam o mesmo efeito sobre a capacidade produtiva do sistema, ambos são independentes. *MTBF* está associado ao número de falhas e *MTTR* se refere ao tempo gasto para reparar cada falha. Pode-se verificar, através dos gráficos, que variações percentuais no *MTTR* produzem maior impacto nas horas-extras que variações nos mesmos percentuais no *MTBF*. Logo, no caso do equipamento estudado, é mais eficaz, para reduzir as horas-extras mensais, concentrar esforços na redução do *MTTR*, através de ações de melhoria na gestão e nas práticas de manutenção empregadas no sistema. Observa-se também que à medida que o *MTTR* diminui, ações para aumento do *MTBF* se tornam cada vez menos eficazes na redução das horas-extras mensais.

A simulação permite que a empresa defina, de acordo com o seu cenário, se investimentos em melhorias na manutenção são vantajosos e qual foco de melhoria (no subconjunto ou nas práticas de manutenção) seria mais eficiente para aumentar a disponibilidade da linha produtiva. Casos onde a demanda é pequena, ainda que a disponibilidade seja baixa, não justificam investimentos em melhoria da manutenção, visto que a necessidade de horas-extras para atender a demanda será baixa. Por outro lado, casos onde a demanda é elevada exigem melhor desempenho da manutenção.

Diante do cenário de crescimento de demanda previsto pela empresa, a simulação demonstrou que o sistema atual não possui capacidade suficiente para atender esta demanda diária de forma satisfatória. O atendimento da demanda requer uma quantidade muito alta de horas-extras, o que aumenta consideravelmente os custos de produção. Por exemplo, para uma previsão de demanda de 15 horas por dia, seriam necessárias cerca de 29 horas-extras no mês. Buscando reduzir esse número de horas-extras mensais através de melhorias na gestão da manutenção, foram determinados novos intervalos entre manutenções para os subconjuntos.

Os intervalos de manutenção para cada subconjunto foram definidos em consenso com a equipe de manutenção e operação. Tendo em vista os custos de parada de linha e os custos de manutenção, a equipe escolheu adotar uma confiabilidade de 80%, ou seja, a equipe aceita uma probabilidade de 20% de que a falha ocorra antes da visita de manutenção preventiva. Isolando-se a variável tempo (t) da fórmula da confiabilidade para distribuição exponencial (eq.1), se obtém o tempo calculado para a realização de visitas periódicas de manutenção em cada subconjunto. Contudo, para facilitar a programação da manutenção, os subconjuntos com tempos para manutenção semelhantes foram agrupados e um tempo médio comum para a

realização dessas visitas foi recomendado. A Tabela 2 apresenta os tempos para manutenção calculados e recomendados para os subconjuntos.

$$\text{para } R(t) = 0,8 \text{ tem-se: } t = MTBF \times [-\ln(0,8)] \quad (\text{eq. 2})$$

TABELA 2 – Tempos em dias calculados e recomendados para manutenção

Conjunto		Subconjunto	Tempo calculado	Tempo recomendado	Tempo recomendado
A	4	Sensores de posicionamento	2,5	2,8	Três vezes por semana
F	20	Etiquetadora	4,3	7	Uma vez por semana
E	21	Quadros de comando	4,9	7	
B	6	Polias, mancais, esteiras e guias	5,2	7	
D	14	Largador de tampas	5,8	7	
C	13	Escovas de orientação	7,0	7	
B	7	Sistema de controle de aplicação, enchimento e fechamento	7,6	7	
C	12	Balanças / Módulos de pesagem	7,9	7	
A	2	Sistema motriz A	12,8	14	Uma vez a cada duas semanas
C	10	Junta rotativa superior	13,9	14	Uma vez a cada três semanas
D	15	Fechador de tampas	18,6	21	
C	18	Sistema de lavagem	21,2	21	
C	11	Bicos de enchimento	21,5	21	
C	19	Sistema motriz C	22,0	21	
A	3	Embreagem do posicionador	178,5	180	Uma vez por semestre
B	5	Sistema motriz B	178,5	180	
C	17	Junta rotativa inferior	178,5	180	

Recomenda-se a realização de visitas periódicas para manutenção: três vezes por semana para os Sensores de posicionamento; a cada sete dias para Etiquetadora, Quadros de comando, Polias, mancais, esteiras e guias, Largador de tampas e Escovas de orientação, Sistema de controle de aplicação, enchimento e fechamento, Balanças/Módulos de pesagem; a cada quatorze dias para Sistema motriz A e Junta rotativa superior; a cada vinte e um dias para Fechador de tampas, Sistema de lavagem, Bicos de enchimento e Sistema motriz C; a cada cento e oitenta dias para Embreagem do posicionador, Sistema motriz B e Junta rotativa inferior. É importante ressaltar que os tempos recomendados para manutenção são para visitas de verificação das condições de operação do subconjunto, conduzindo, quando necessário, à realização de lubrificações, limpezas, reapertos e substituições de componentes.

A definição das atividades de manutenção mais adequadas para cada subconjunto foi baseada na experiência dos responsáveis pela manutenção e operadores da linha, bem como na recomendação contida nos manuais dos equipamentos. Contudo, a periodicidade dessas manutenções levou em consideração o tempo recomendado de manutenção definido anteriormente. Foram elaboradas Folhas de Verificação contendo informações sobre as atividades e periodicidade da manutenção para os operadores, no caso de manutenção autônoma, e para os técnicos de manutenção, no caso de manutenção não-autônoma.

CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção *just in time*. Cenários *just-in-time* se caracterizam por estoques reduzidos (ou nulos) e a necessidade de atender a programação da produção no próprio turno de trabalho.

Após a identificação dos conjuntos e subconjuntos que influenciam a confiabilidade dos equipamentos estudados, foram levantadas suas taxas de falhas, tempos de bom funcionamento, tempos de reparo e disponibilidade. A seguir, foram obtidos dados de ocupação da linha de produção e sua distribuição de probabilidade, bem como as distribuições de probabilidade dos tempos de bom funcionamento e tempos de reparo. Posteriormente, foi realizada uma simulação da produção, falhas e manutenção, utilizando-se o método de Monte Carlo, a fim de definir, através de métodos estocásticos, a probabilidade de que a linha não atenda a demanda diária de produção. Na sequência, foi realizada uma análise de sensibilidade das horas-extras e tempos de parada de máquinas a eventuais variações na demanda, *MTBF* e *MTTR*. Através dos resultados da simulação do cenário de crescimento da demanda previsto pela empresa, foi identificada a necessidade de melhorias na gestão da manutenção. A fim de melhorar a disponibilidade e confiabilidade da linha, foram estabelecidos novos intervalos de manutenções preventivas para os subconjuntos.

O levantamento e as análises dos *MTBFs* e *MTTRs* dos subconjuntos permitiram, além da determinação de intervalos ótimos entre manutenções, a identificação de subconjuntos críticos e a escolha do tipo de ação mais adequada para melhorar seu desempenho. Subconjuntos com baixo *MTBF* necessitam de melhorias na política de manutenção, subconjuntos com alto *MTTR* necessitam de melhoria da capacitação e dos recursos da equipe de manutenção.

A simulação possibilitou a análise da resposta do sistema, quanto às horas de parada de máquina e comportamento das horas-extras para atender a demanda diária, considerando possíveis variações de demanda, *MTBF* e *MTTR*. O uso do Método de Monte Carlo permitiu a inclusão da variabilidade, natural do sistema, na simulação. Estes resultados auxiliam a empresa na tomada de decisão quanto à necessidade e ao tipo de investimentos em manutenção que melhor atenderiam ao cenário de demanda projetado.

Por fim, vale ressaltar as delimitações deste estudo. Este trabalho limitou-se ao estudo de um cenário produtivo, onde a demanda deve ser atendida no mesmo turno de trabalho e é possível o uso de horas extras para compensar picos de demanda ou paradas devido a quebra de conjuntos. Outros cenários, por exemplo, onde não é possível o uso de horas extras ou existem estoques que podem amortizar problemas de confiabilidade exigiriam abordagens diferenciadas. O cenário com estoque será objeto de um artigo futuro.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo fornecimento de bolsa de pesquisa. Também agradecemos à empresa que permitiu a realização deste estudo colaborando com a disponibilização de informações.

REFERÊNCIAS

BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; GABRIELLI, R. Monte Carlo Simulation approach for a modified FMECA in a power plant. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 16, p. 313-324, 2000.

BLOOM, N. B. *Reliability Centered Maintenance: implementation made simple*. New York, McGraw-Hill, 2006.

DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. Application of RCM to a medium scale industry. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 77, n. 1, p. 31-43, 2002.

FARRERO, J. C.; TARRÉS, L. G.; LOSILLA, C. B. Optimization of replacement stocks using a maintenance programme derived from reliability studies of production systems. *Industrial Management & Data Systems*, v. 102, n. 4, p. 188-196, 2002.

- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Campus - Elsevier, 2009.
- GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.
- LAFRAIA, J. R. B. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- MÁRQUEZ, A. C.; LÉON, P. M.; FERNÁNDEZ, J. F. G.; MÁRQUEZ, C. P.; CAMPOS, M. L. The maintenance management framework. A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 15, n. 2, p. 167-178, 2009.
- NGUYEN, D. Q.; BRAMMER, C.; BAGAJEWICZ, M. New tool for the evaluation of the scheduling of preventive maintenance for chemical process plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 47, n. 6, p. 110-124, 2008.
- RAO, P. N., SRIKRISHNA, S., YADAVA, G. S. Reliability-centred maintenance applied to power plant auxiliaries. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 2, n. 1, p. 3-14, 1996.
- RAUSAND, M. Reliability Centered Maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 60, n. 2, p. 121-132, 1998.
- SANTOS, W. B.; COLOSIMO, E. A.; MOTTA, S. B. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. *Revista Gestão e Produção*, v. 14, n. 1, p. 193-202, 2007.
- SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. *Revista Produção*, v. 15, n. 1, p. 44-59, 2005.
- SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4 ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2005.
- WILMETH, G. W., USREY, M. W. Reliability centered maintenance: a case study, *Engineering Management Journal*, v. 12, n. 4, p. 25-31, 2000.

4 TERCEIRO ARTIGO

Dimensionamento da manutenção preventiva em cenários de produção protegida por estoques

Resumo

Este artigo apresenta um método para desenvolver análises quantitativas que contribuam para a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção protegido por estoques. O método proposto contempla: identificação dos subconjuntos que influenciam a confiabilidade dos equipamentos, classificação quanto ao efeito e criticidade das falhas; levantamento da estratégia de manutenção atual e estoque de proteção mantido ao final da linha; levantamento dos *MTBFs* e *MTTRs* e identificação das respectivas distribuições de probabilidade; definição da estratégia mais adequada para a manutenção, estabelecimento de intervalos de inspeção otimizados, simulação da produção/manutenção para comparar a estratégia atual com a estratégia otimizada, estimativa das horas de interrupção da expedição envolvidas, análise de sensibilidade das horas de interrupção da expedição a eventuais variações no tamanho do estoque de proteção e no *MTTR*. O estudo revelou que o cenário otimizado promove uma redução de cerca de 27% nas horas de parada de expedição e que uma redução de 15% no *MTTR* promove uma redução de 21% nas horas de parada de expedição. A aplicação do método é ilustrada através de um estudo real realizado em uma linha de rotulagem e enchimento de *sprays* de uma empresa do setor de tintas e corantes. Os resultados obtidos permitiram estabelecer recomendações referentes à melhor estratégia de manutenção, tamanho do estoque de proteção e metas para tempos médios de reparo.

Palavras-chave: manutenção centrada em confiabilidade, simulação de Monte Carlo, sistema de produção protegido por estoques, plano de manutenção.

Abstract

This paper presents a method to develop quantitative analysis to support the review or preparation of maintenance plans for a scenario of production protected by stocks. The proposed method includes: identification of parts that influence equipment reliability, classification according to the effect and criticality of failures, identification of current

maintenance strategy and protecting stock, identification of MTBFs, MTTRs and corresponding probability distributions, definition of the most appropriate maintenance strategy and optimum inspection intervals, simulation of production / maintenance to compare the current maintenance strategy with the optimal maintenance strategy, sensitivity analysis for interruption expedition hours according to variations in protecting stock size and MTTR. The study revealed that the optimized maintenance strategy promotes a reduction of 27% on interruption expedition hours and that a reduction of 15% on MTTR promotes a reduction of 21% on interruption expedition hours. The method is illustrated through a real application comprising the scenario of a labeling and filling sprays line at a paints and dyes production company. The results allow the establishment of recommendations regarding best maintenance strategy, stock size and goals for mean time to repair.

Key-words: reliability centered maintenance, Monte Carlo simulation, production system protected by stocks, maintenance plan.

INTRODUÇÃO

Muitas empresas ao redor do mundo já perceberam a importância de uma gestão da manutenção efetiva, principalmente considerando os recursos por ela demandados e a sua influência direta na disponibilidade produtiva (NGUYEN *et al.* 2008). A adequação dos custos e a acurácia das atividades são os dois critérios básicos para uma boa manutenção. A redução dos custos de manutenção possibilita o aumento dos lucros da empresa e a acurácia das atividades garante uma operação contínua e confiável dos equipamentos (NIU *et al.* 2010).

Um dos paradigmas da manutenção é o conceito que todas as falhas são prejudiciais e devem ser prevenidas ou que o aumento das atividades de manutenção em um item aumenta, necessariamente, a sua confiabilidade. Porém, tecnicamente, muitas falhas não podem ser antecipadas e, mesmo se pudessem ser prevenidas, os custos da manutenção seriam proibitivos (RAUSAND, 1998; DESHPANDE; MODAK, 2002). Além disso, em equipamentos com comportamento aleatório de falhas ou em fase de falhas prematuras, a execução de manutenção não é eficaz, podendo, inclusive, introduzir defeitos no equipamento (LAFRAIA, 2001). Por outro lado, negligenciar a manutenção pode trazer consequências catastróficas para a segurança, o meio ambiente e a produtividade da empresa (BLOOM, 2006).

Rausand (1998) enfatiza que os aspectos relacionados à manutenção devem, preferencialmente, ser considerados na fase de desenvolvimento do conceito do equipamento. As atividades de manutenção devem ser previstas de forma que o acesso aos equipamentos e sua execução seja simplificada. Esse autor ainda lembra que detalhes da estratégia de manutenção também devem ser considerados no projeto da operação da planta.

Para Bloom (2006), a manutenção centrada em confiabilidade é uma maneira lógica de identificar em quais equipamentos da planta deve ser empregada a manutenção preventiva e quais equipamentos devem ser selecionados para rodar-até-a-falha. Fogliatto e Ribeiro (2009) e Kianfar e Kianfar (2010) complementam afirmando que a MCC é um programa que reúne várias técnicas de engenharia para assegurar que os equipamentos continuarão realizando suas funções perfeitamente e com custos reduzidos.

Os principais aspectos da MCC referem-se ao reconhecimento de falhas escondidas, ao entendimento das ocasiões onde a análise simples de falha não é recomendável e a identificação de situações onde rodar-até-a-falha é aceitável (BLOOM, 2006; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Além disso, a compreensão do conceito de redundância e suas formas de operação no sistema são fundamentais para uma correta análise de confiabilidade da planta (BLOOM, 2006; LAFRAIA, 2001).

Vale ressaltar que a espinha dorsal de muitas empresas é sua eficácia na manufatura de produtos. Neste contexto, uma boa gestão da manutenção pode reduzir os tempos de parada de linha associados às falhas e melhorar a disponibilidade da planta (HANSEN, 2006). Sabe-se que altos custos estão associados às paradas de linha e aos reparos, contudo algumas falhas causam apenas a deterioração do desempenho da planta, fato que muitas vezes não é percebido pela empresa, mas pode reduzir consideravelmente a eficácia da produção e, conseqüentemente, a competitividade no mercado (NGUYEN *et al.* 2008).

Considerando esses elementos, o objetivo deste trabalho é desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção protegida por estoques. Cenários de produção protegida por estoques se caracterizam pela existência de estoques finitos, de forma que a linha de produção não é necessariamente interrompida pela quebra de um equipamento. Se o reparo for feito enquanto durar o estoque finito, a linha não é interrompida. Por outro lado, se o tempo de reparo for superior à folga que o estoque finito proporciona, então haverá parada de linha.

Sistemas de produção protegida por estoques são empregados principalmente em situações onde há grande flutuação da demanda ou onde os processos de produção apresentam paradas não planejadas. Esses sistemas são utilizados a fim de garantir o nível de serviço desejado pela empresa, evitando problemas relacionados ao não cumprimento de prazos de entrega, ao cancelamento de pedidos e a perdas de oportunidade. Porém, o excesso de estoques origina altos custos operacionais e de oportunidade do capital. Dessa forma, a redução de custos requer uma solução balanceada entre o nível de serviço e o volume de estoques.

Neste contexto, a manutenção tem papel fundamental para o aumento da confiabilidade dos processos produtivos, redução de paradas não planejadas e, por consequência, para a redução da quantidade de estoques armazenados. O uso do método de Monte Carlo para simulação de resultados obtidos com a otimização da manutenção possibilita a análise da resposta do sistema a variações na estratégia de manutenção e *MTTR*. O estudo realizado revelou que o cenário otimizado promove uma redução de cerca de 27% nas horas de parada de expedição, permitindo trabalhar com menores estoques de proteção. Paralelamente, foi possível observar que uma redução de 15% no *MTTR* promove uma redução de 21% nas horas de parada de expedição. Estes resultados auxiliam a empresa na tomada de decisão quanto à quantidade e ao tipo de investimento em manutenção que permitem a redução do estoque de proteção sem, no entanto, que o sistema diminua seu desempenho.

O dimensionamento da manutenção preventiva, através de análises quantitativas, considerando o tipo de cenário produtivo envolvido, é essencial para prever a real capacidade produtiva e evitar gastos desnecessários em atividades de manutenção, bem como para orientar projetos de melhorias que efetivamente contribuam para o melhor atendimento da demanda.

Este artigo está estruturado em cinco seções. Na seção 2, é apresentado o referencial teórico sobre os tipos de falhas e a classificação de equipamentos no âmbito da MCC. Na seção 3, são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para realizar o trabalho e solucionar o problema de pesquisa. Os resultados obtidos, bem como sua discussão, são apresentados na seção 4. Por fim, na seção 5, são apresentadas as conclusões referentes ao estudo realizado.

REFERENCIAL TEÓRICO

Para identificar as falhas de um sistema, é necessário, primeiramente, entender suas funções e padrão de desempenho (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Rausand (1998) classifica as funções dos equipamentos como: *i)* essenciais; *ii)* auxiliares; *iii)* de proteção; *iv)* de informação; *v)* de interface e *vi)* supérfluas.

Após identificar as funções do sistema, seus modos de falha e as causas das falhas, é importante analisar de que forma cada falha interessa. A classificação das falhas mais difundida na literatura organiza as mesmas em: falhas escondidas, falhas que afetam a segurança, falhas que afetam o meio ambiente, falhas com consequências operacionais e falhas não operacionais (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; BLOOM, 2006; RAUSAND, 1998; KIANFAR; KIANFAR, 2010; RAO *et al.*, 1996; DESHPANDE; MODAK, 2002). Bevilacqua *et al.* (2000) acrescentam que a análise da criticidade das falhas deve considerar, também, a importância do equipamento para o processo, o custo da manutenção, o tempo de parada de produção, as condições operacionais e a dificuldade de acesso ao local da manutenção.

Falhas escondidas ocorrem quando a perda da função do equipamento não é evidente para o pessoal operacional. Esse tipo de falha ocorre normalmente em equipamentos com redundância, onde as consequências da falha não são aparentes instantaneamente, sendo dependentes de uma segunda falha em outro equipamento. Equipamentos redundantes com falhas escondidas muitas vezes são classificados erroneamente como itens que podem rodar-até-a-falha. O grande problema deste tipo de classificação é a falsa sensação de proteção do sistema, pois, de fato, uma falha catastrófica pode ocorrer a qualquer momento após uma primeira falha. O ideal, neste caso, seria uma análise de falhas múltiplas, com a determinação de uma atividade de manutenção periódica de procura por falhas (BLOOM, 2006).

Redundância significa que há mais de um equipamento disponível para realizar uma função. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), existem basicamente três tipos de redundância. A redundância pura ocorre quando todos os equipamentos são ativados quando o sistema é ativado e eventuais falhas não afetam a confiabilidade dos equipamentos sobreviventes. Na redundância com carga compartilhada, a taxa de falha dos equipamentos sobreviventes aumenta à medida que falhas ocorrem, como, por exemplo, em turbinas de aviões. Na redundância em *standby*, por sua vez, o equipamento redundante somente é ativado se um dos equipamentos em operação falhar.

Através da análise de falhas é possível identificar a criticidade do equipamento para a planta e definir o tipo de abordagem de manutenção mais apropriada (RAUSAND, 1998; RAO *et al.*, 1996; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; BLOOM, 2006). Equipamentos críticos são aqueles itens cuja falha conduz a uma consequência indesejada imediatamente após a sua ocorrência, sendo necessária a definição de uma atividade de manutenção preventiva. Equipamentos potencialmente críticos são aqueles cuja falha não conduz a uma consequência indesejada imediatamente após sua ocorrência, mas, após a falha de um segundo equipamento, a função do sistema é interrompida. Equipamentos redundantes devem ser classificados como tal e uma atividade periódica de procura por falhas ou monitoramento contínuo deve ser estabelecida (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; BLOOM, 2006).

Deshpande e Modak (2002) citam ainda os equipamentos economicamente críticos, que são aqueles cuja falha não acarreta uma consequência grave para a planta. No entanto, o custo de sua manutenção corretiva é muito elevado, de modo que uma atividade de manutenção preventiva é preferida.

Equipamentos cujas falhas não possuem consequências ambientais, de segurança, de violação de legislação e operacional são chamados equipamentos não-operacionais, desde que a manutenção corretiva seja mais vantajosa economicamente que a preventiva. Nestes casos, estes equipamentos são designados para rodar-até-a-falha, onde nenhuma atividade de manutenção preventiva é realizada. Vale ressaltar que equipamentos designados para rodar-até-a-falha devem apresentar somente falhas evidentes e as respectivas atividades de manutenção corretiva podem e devem ser previamente planejadas (BLOOM, 2006; RAO *et al.*, 1996). A Figura 1 apresenta um diagrama de decisão que facilita o entendimento da classificação de criticidade dos componentes e da estratégia de manutenção mais adequada.

MÉTODO DE TRABALHO

Quanto a sua natureza, esta pesquisa classifica-se como pesquisa aplicada, onde se objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos. Quanto à forma de abordagem do problema, esta pesquisa classifica-se como pesquisa quantitativa. A pesquisa quantitativa considera que os aspectos de interesse da pesquisa podem ser quantificáveis, o que significa traduzir os mesmos em números e informações para classificá-los e analisá-los (SILVA; MENEZES, 2005).

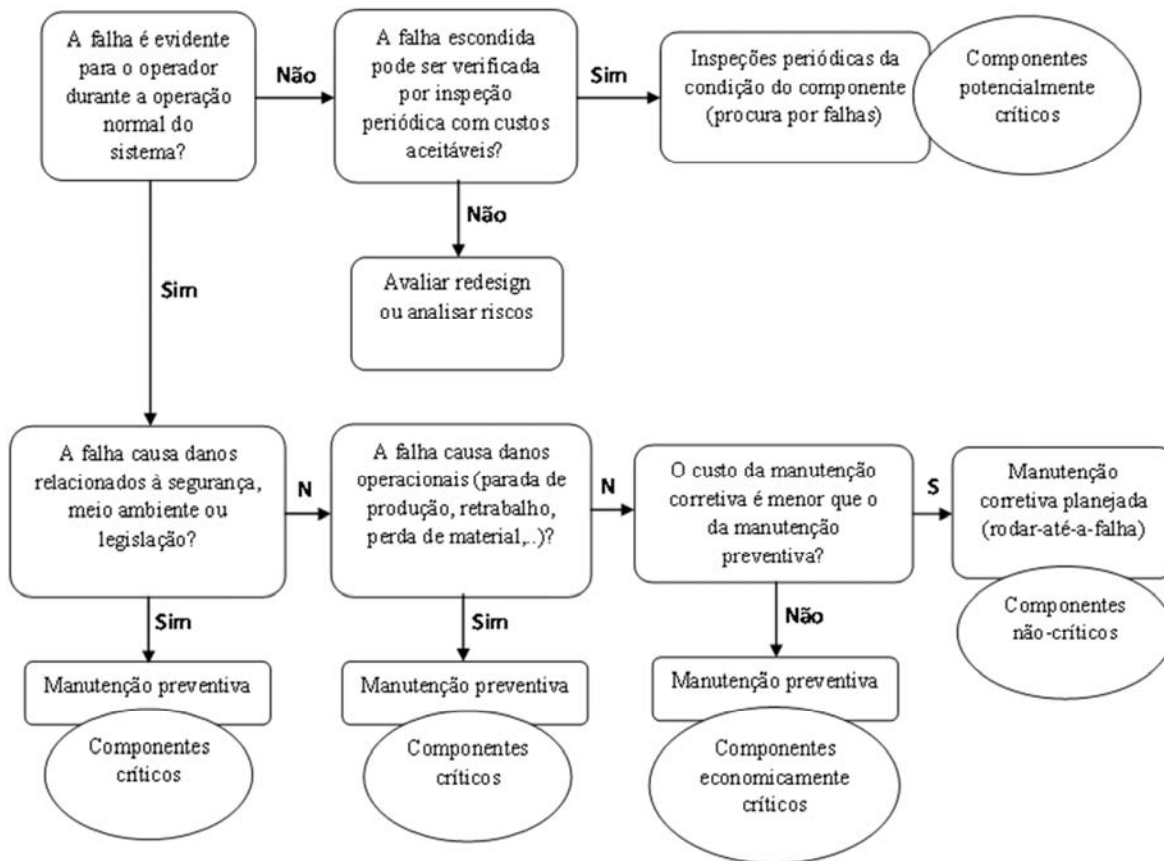


Figura 1 - Diagrama de decisão para classificação de componentes
 Fonte - Adaptado de RAO *et al.* (1996)

Do ponto de vista de seus objetivos, esta pesquisa classifica-se como exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito. Envolve levantamento bibliográfico e estudo de exemplos que estimulam a compreensão do problema pesquisado. Quanto aos seus procedimentos técnicos, esta pesquisa classifica-se como pesquisa-ação. A pesquisa-ação é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo (GIL, 1999).

O desenvolvimento deste trabalho envolveu onze etapas principais: (i) identificação de uma empresa e respectivos equipamentos que atendam o critério de produção protegida por estoques; (ii) identificação dos conjuntos ou subconjuntos que influenciam a confiabilidade dos equipamentos a serem estudados; (iii) classificação dos conjuntos ou subconjuntos quanto ao efeito e correspondente criticidade de suas falhas; (iv) levantamento da estratégia de manutenção atual; (v) identificação do estoque de proteção (pulmão), em horas de trabalho,

mantido ao final da linha e as necessidades futuras da empresa em relação a esse estoque; (vi) levantamento dos tempos de bom funcionamento, tempos de reparo e disponibilidade dos subconjuntos identificados; (vii) identificação das distribuições de probabilidade dos tempos de bom funcionamento e dos tempos de reparo dos subconjuntos; (viii) definição da estratégia mais adequada para a manutenção (que neste artigo será chamada de estratégia "otimizada"), considerando os tempos de bom funcionamento e a criticidade das falhas, e estabelecimento de intervalos de inspeção otimizados, que consideram tanto os tempos de bom funcionamento como a criticidade de cada subconjunto; (ix) simulação da produção/manutenção para comparar a estratégia atual com a estratégia otimizada, possibilitando, através do uso de métodos estocásticos, a estimativa do número de paradas em cada caso, bem como das horas de manutenção, horas de parada de linha e horas de interrupção da expedição envolvidas; (x) realização de uma análise de sensibilidade das horas de interrupção da expedição a eventuais variações no tamanho do estoque de proteção e no *MTTR*; (xi) estabelecimento de recomendações referentes a melhor estratégia de manutenção, tamanho do estoque de proteção e metas para tempos médios de reparo.

O trabalho foi realizado na filial gaúcha de uma empresa multinacional do setor de tintas e corantes. Escolheu-se a linha de rotulagem e enchimento de *sprays*, chamada *Colorjet*, devido a sua criticidade em termos de ocupação, número de chamados de manutenção e condição operacional desejada, no caso: produção protegida por estoque. A equipe da manutenção da empresa, juntamente com a equipe de operação da linha, identificou o sistema de maior interesse, a ser analisado. Esse sistema é composto por três máquinas, que envolvem doze conjuntos e dezenove subconjuntos.

Posteriormente, os subconjuntos foram classificados, de acordo com a criticidade de suas falhas, conforme a Figura 1 deste trabalho, em: conjuntos críticos, conjuntos potencialmente críticos, conjuntos economicamente críticos e conjuntos não-críticos. A classificação de cada subconjunto foi realizada juntamente com o responsável pela manutenção da linha *Colorjet*.

Na sequência, foram calculados os tempos médios de reparo (*MTTR*), tempos médios de bom funcionamento (*MTBF*) e a disponibilidade de cada subconjunto. Para os subconjuntos que não apresentavam registro da ocorrência de nenhuma falha em todo o período analisado, foi considerada disponibilidade = 1,0.

Para verificar o modelo de distribuição de probabilidade que melhor se ajustava aos dados de tempos de bom funcionamento e tempos de reparo foram realizados testes

estatísticos no *software* PROCONF. Uma dificuldade encontrada no estudo é que muitos subconjuntos, individualmente, apresentavam um número pequeno de falhas no período em estudo. Por outro lado, outros conjuntos apresentavam um número suficiente de dados para proceder o estudo matemático da forma da distribuição. Para esses conjuntos que apresentavam um número suficiente de falhas, o melhor ajuste foi obtido com um modelo de *Weibull* e parâmetro de forma gamma (γ) próximo de 1,5. Na medida em que os subconjuntos apresentam características similares, constituídos de componentes mecânicos expostos ao mesmo cenário de produção e manutenção, optou-se por usar o mesmo parâmetro de forma para representar todos os conjuntos. O parâmetro de escala, por sua vez, foi ajustado individualmente para representar a média dos tempos de bom funcionamento observados para cada subconjunto.

A estratégia de manutenção otimizada, com a definição de novos intervalos entre manutenções preventivas, foi elaborada utilizando-se os percentis da distribuição de probabilidade de *Weibull* representativa dos tempos de bom funcionamento de cada subconjunto e a tolerância da empresa quanto à probabilidade de que a falha ocorra no subconjunto antes da execução da manutenção. Utilizou-se como base a classificação de criticidade realizada na etapa (iii) deste trabalho. Para os subconjuntos classificados como equipamentos críticos, definiu-se o intervalo entre manutenções preventivas como o percentil de 15% dos tempos de bom funcionamento. Para os subconjuntos classificados como equipamentos potencialmente críticos, optou-se por utilizar um percentil de 30% dos tempos de bom funcionamento. Para aqueles subconjuntos classificados como equipamentos não-críticos optou-se por deixá-los rodar-até-a-falha.

A fim de simular a produção/manutenção para comparar a estratégia atual com a estratégia otimizada, foi desenvolvido um estudo de simulação de Monte Carlo das atividades de produção, falhas e manutenção. Essa simulação permitiu estimar, através de métodos estocásticos, o número de paradas em cada caso, bem como as horas de manutenção, horas de parada de linha e horas de interrupção da expedição envolvidas. A simulação envolveu a determinação da probabilidade de falha diária de cada subconjunto da linha, considerando que, devido ao fato de que os dados são modelados por uma distribuição de *Weibull* com parâmetro de forma igual a 1,5, a probabilidade de falha é crescente dentro do intervalo entre manutenções.

A simulação dividiu-se em quatro etapas: i) inicialmente foram geradas as probabilidades de falha diária para cada subconjunto, baseada na sua distribuição de

probabilidade; *ii*) a seguir, baseando-se nessa probabilidade, foram gerados dados diários de sucesso ou falha para cada subconjunto; *iii*) posteriormente, para os subconjuntos que falharam em cada dia simulado, foram gerados tempos de reparo, utilizando-se as respectivas distribuições dos tempos de reparo dos subconjuntos; *iv*) por fim, através dos tempos de reparo, foram gerados tempos de parada de linha, e a subtração entre estes tempos de parada de linha e o estoque de proteção em horas produzidas gerou os tempos de interrupção de expedição.

As variáveis de controle ou de entrada para a simulação são: o cenário de manutenção desejado (atual ou otimizado), o *MTBF* de cada subconjunto (que irá definir os parâmetros γ e θ , forma e escala, da distribuição de probabilidade de falhas), o *MTTR* e o estoque de proteção em horas para o sistema. Como resultados da simulação têm-se as estimativas de: horas de manutenção preventiva, horas totais de manutenção (preventiva e corretiva), número total de falhas, número total de horas de reparo e número de horas de interrupção da expedição. Caso a soma das horas de reparo de determinado dia seja superior ao estoque de proteção em horas de produção, haverá a interrupção da expedição de produtos da linha, caso contrário a demanda será suprida pelo estoque de proteção. A Figura 5 apresenta um modelo resumido da simulação para alguns subconjuntos. Nessa figura, as estatísticas apresentadas, horas de manutenção preventiva, horas de reparo, total de horas de manutenção, horas de parada de expedição, número de falhas, se referem a médias anuais.

O estudo de simulação permitiu verificar a ocorrência de interrupção da expedição dos produtos produzidos na linha, e conseqüente não atendimento da demanda, devido à falta de itens disponíveis. Essa interrupção ocorre devido a tempos de reparo elevados que levam ao consumo do estoque de proteção. Vale observar que, supondo necessidade de utilização total da capacidade da linha para atendimento da demanda diária ou reposição de estoque consumido no dia anterior, possíveis paradas da linha para manutenção corretiva obrigam o consumo do estoque de proteção para o atendimento da demanda. Logo, tempos de reparo maiores que o estoque disponível gera a falta de produtos e a interrupção da expedição.

Posteriormente foi realizada uma análise de sensibilidade das horas de interrupção da expedição a eventuais variações no estoque de proteção e no *MTTR* de cada subconjunto. Foram gerados gráficos representando dois cenários de manutenção: cenário 1, correspondente à estratégia atual da empresa, com manutenção preventiva efetuada em intervalos regulares, realizada a cada trinta dias em todo o sistema; e cenário 2, com manutenção otimizada, realizada em intervalos ajustados para cada conjunto. Para cada

cenário foi possível estimar as horas de interrupção de expedição, função do tamanho do estoque de proteção disponível e do *MTTR*, permitindo a visualização do impacto dessas duas variáveis sobre as horas de interrupção de expedição.

Por fim, foram estabelecidas recomendações referentes à melhor estratégia de manutenção, com intervalos entre inspeções ajustados para cada subconjunto, juntamente com metas para tempos médios de reparo e tamanhos de estoque de proteção reduzidos, que proporcionam redução de custos, melhor aproveitamento da planta e asseguram igual desempenho do sistema.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 1 apresenta os conjuntos e subconjuntos que compõem o sistema analisado, bem como a classificação de criticidade de falha de cada subconjunto conforme a etapa *iii* do Método de Trabalho apresentado neste artigo.

Quadro 1 - Composição do sistema e classificação de criticidade dos subconjuntos

Máquina	Cd	Conjunto	Subconjunto	Classificação	Tipo de Manutenção
494	A	Sistema de dosagem de tinta	Sensor de presença de embalagem	Crítico	Manutenção preventiva
			Bomba pneumática	Crítico	Manutenção preventiva
			Bomba volumétrica	Crítico	Manutenção preventiva
			Filtro gaf	Crítico	Manutenção preventiva
	B	Sistema de dosagem de gás	Bombas centrífugas 1 e 2	Potencialmente crítico	Inspeção periódica
			Bombas dosadoras volumétricas 1 e 2	Crítico	Manutenção preventiva
			Bicos de injeção de gás 1 e 2	Crítico	Manutenção preventiva
	C	Mesa de transporte	Mesa de alimentação de embalagem	Crítico	Manutenção preventiva
			Estrela posicionadora	Crítico	Manutenção preventiva
			Sistema de catraca	Crítico	Manutenção preventiva
	D	Largador de bolinhas	Largador de bolinhas	Crítico	Manutenção preventiva
	E	Recravador	Recravador	Potencialmente crítico	Inspeção periódica
	496	A	Coletor	Coletor	Crítico	Manutenção preventiva
B		Etiquetadora (impressora)	Etiquetadora (impressora)	Crítico	Manutenção preventiva
C		Aplicador de	Aplicador de etiquetas	Crítico	Manutenção

		etiquetas			preventiva
	D	Aplicador de etiquetas lacre	Aplicador de etiquetas lacre	Não-crítico	Rodar-até-a-falha
497	A	Inversor	Inversor	Crítico	Manutenção preventiva
	B	Posicionador de embalagem	Posicionador de embalagem	Crítico	Manutenção preventiva
494-496-497	H	Quadro de comando	Quadro de comando	Crítico	Manutenção preventiva

As Bombas centrífugas 1 e 2 foram classificadas como equipamento potencialmente crítico, pois são bombas redundantes em *standby*, onde a falha da bomba operante envia um sinal automático para a bomba em *standby* começar a operar. O Recravador foi classificado como equipamento potencialmente crítico devido ao fato de que sua falha nem sempre é evidente para o operador, havendo a necessidade de inspeções periódicas.

O Aplicador de etiquetas lacre foi classificado como equipamento não-crítico, podendo rodar-até-a-falha, porque sua falha não representa danos de segurança, ambiental ou operacional e o custo da aplicação de manutenções preventivas seria maior que o custo ocasionado pela falha. A falha deste item não gera parada da linha, pois o mesmo se encontra ao final da linha, sendo possível a aplicação do lacre na embalagem do produto posteriormente ao conserto do subconjunto.

Os demais subconjuntos foram classificados como equipamentos críticos por que causam algum tipo de dano relacionado à segurança, meio ambiente ou a operação normal da linha.

Quanto à estratégia de manutenção atual, verificou-se, junto ao responsável pela manutenção da linha, que a empresa realiza manutenção preventiva em todos os subconjuntos em intervalos de 30 dias. Quanto ao estoque de proteção (pulmão), verificou-se que a empresa mantém ao final da linha um estoque equivalente a, aproximadamente, duas horas de produção. A fim de reduzir custos e aproveitar melhor o espaço disponível na planta, a empresa deseja diminuir este estoque, porém necessita que o nível de serviço da linha seja mantido.

O levantamento das taxas de falha foi feito através da coleta de dados de manutenção existentes nas Ordens de Serviço da empresa dos anos de 2009 e 2010 (descrição da falha, data de ocorrência e tempo de reparo). Os dados foram organizados, revisados e completados pela equipe de manutenção, pois muitas Ordens de Serviço não apresentavam descrições

claras sobre o serviço de manutenção executado. Assim, com a ajuda da equipe de manutenção, foram identificados o conjunto e subconjunto associado a cada falha registrada.

Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentados, respectivamente, os tempos médios de bom funcionamento, tempos médios de reparo e a disponibilidade dos subconjuntos. Observa-se na Figura 2 que o subconjunto Quadro de comando possui o menor tempo médio de bom funcionamento. Em média, a cada dezoito dias ocorre uma falha nesse subconjunto. Por outro lado, o subconjunto Recravador apresenta o maior tempo médio de reparo, cerca de três horas, conforme a Figura 3. Assim, como pode ser observado na Figura 4, o Recravador e o Quadro de comando são os subconjuntos com menores disponibilidades, 0,9937 e 0,9946, respectivamente.

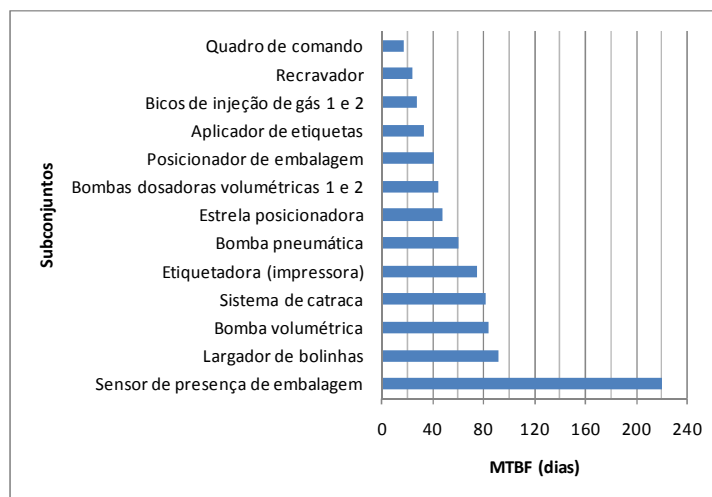


Figura 2 - Tempo médio de bom funcionamento em dias

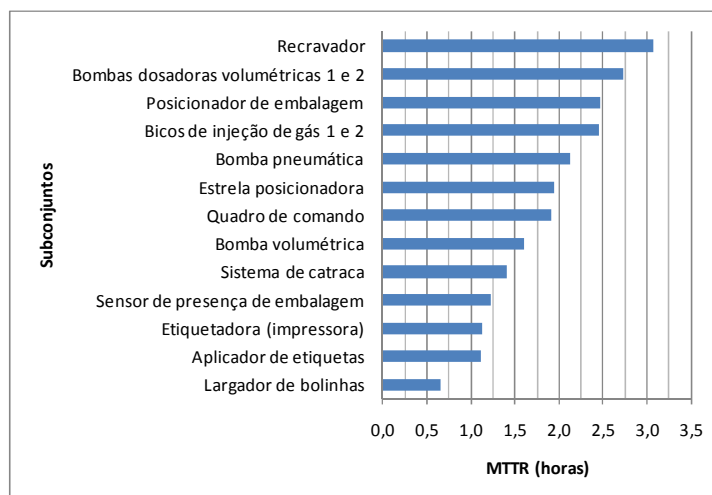


Figura 3 - Tempo médio de reparo em horas



Figura 4 - Disponibilidade

A Tabela 1 apresenta o resultado da definição de novos intervalos entre manutenções preventivas. O intervalo entre manutenções calculado depende da distribuição de probabilidade ajustada para os dados de tempos de bom funcionamento e da proteção desejada para cada subconjunto. O intervalo entre manutenções recomendado aproxima os intervalos calculados em dias, formando pacotes de manutenção semanal, o que facilita a programação, o controle e a execução das atividades de manutenção.

Conforme pode ser observado na Tabela 1: o Quadro de comando deve ser inspecionado uma vez por semana; o Recravador, os Bicos de injeção de gás 1 e 2, o Aplicador de etiquetas, o Posicionador de embalagem, as Bombas dosadoras volumétricas 1 e 2 e a Estrela posicionadora devem ser verificados a cada duas semanas; para a Bomba pneumática, a Etiquetadora (impressora), o Sistema de catraca, a Bomba volumétrica e o Largador de bolinhas recomenda-se manutenção preventiva a cada quatro semanas ou uma vez por mês; o Sensor de presença de embalagem deve ser inspecionado a cada dez semanas; o Filtro gaf e o Coletor necessitam de verificação a cada trinta e duas semanas ou oito meses; para a Mesa de alimentação de embalagem e o Inversor recomenda-se manutenção preventiva a cada quarenta e quatro semanas ou onze meses; as Bombas centrífugas 1 e 2 requerem inspeção a cada setenta e duas semanas ou uma vez a cada dezoito meses; o Aplicador de etiquetas lacre não necessita manutenção, devendo rodar-até-a-falha.

TABELA 1 - Intervalos entre manutenções (calculado e recomendado)

Subconjunto	Confiabilidade até a manutenção	Intervalo entre manutenções calculado (dias)	Intervalo entre manutenções recomendado (múltiplos de 7 dias)	Intervalo de manutenção atual
Quadro de comando	0,85	5,9	7 dias	30 dias
Recravador	0,7	13,9	14 dias	30 dias
Bicos de injeção de gás 1 e 2	0,85	9,0	14 dias	30 dias
Aplicador de etiquetas	0,85	11,1	14 dias	30 dias
Posicionador de embalagem	0,85	13,9	14 dias	30 dias
Bombas dosadoras volumétricas 1 e 2	0,85	14,9	14 dias	30 dias
Estrela posicionadora	0,85	15,7	14 dias	30 dias
Bomba pneumática	0,85	20,1	28 dias	30 dias
Etiquetadora (impressora)	0,85	24,9	28 dias	30 dias
Sistema de catraca	0,85	27,4	28 dias	30 dias
Bomba volumétrica	0,85	28,3	28 dias	30 dias
Largador de bolinhas	0,85	30,7	28 dias	30 dias
Sensor de presença de embalagem	0,85	73,8	70 dias	30 dias
Filtro gaf	0,85	229,2	224 dias	30 dias
Coletor	0,85	229,2	224 dias	30 dias
Mesa de alimentação de embalagem	0,85	302,5	308 dias	30 dias
Inversor	0,85	302,5	308 dias	30 dias
Bombas centrífugas 1 e 2	0,7	510,8	504 dias	30 dias
Aplicador de etiquetas lacre		Rodar-até-a-falha		30 dias

A simulação da produção, falhas e manutenção comparando a estratégia de manutenção atual com a estratégia de manutenção otimizada foi realizada seguindo os princípios do Método de Monte Carlo. Para basear a análise em uma amostra suficientemente grande, foram simulados 3650 dias de operação, que equivale a dez anos de trabalho, considerando que a linha trabalha de segunda a domingo.

É importante ressaltar que as probabilidades de falha diária dos subconjuntos são crescentes à medida que o intervalo entre manutenções aumenta. A probabilidade da ocorrência de uma falha no segundo dia após a realização da última manutenção é maior que a probabilidade de falha no primeiro dia, e assim sucessivamente. Este fato se deve ao tipo de distribuição de probabilidade ajustada para os dados (*Weibull* com parâmetro de forma 1,5), onde a taxa de falha é crescente ao passar do tempo. Porém, ao ser realizada a manutenção, a probabilidade de ocorrência de falha é reduzida novamente ao ponto inicial da distribuição. Isso equivale a considerar que as atividades de manutenção (lubrificação, limpeza, reaperto,

calibragem, eventual troca de peças, etc.) restauram o conjunto a boas condições de operação, equivalentes à condição de um conjunto novo.

A fim de facilitar a visualização dos resultados da simulação para os dois cenários (atual e otimizado) e verificar o impacto da redução do estoque de proteção e do tempo médio de reparo, foi realizada uma análise de sensibilidade das horas de interrupção da expedição a eventuais variações nesses parâmetros. A Tabela 2 e a Figura 6 apresentam os resultados da simulação para o cenário atual, onde a manutenção é realizada em um intervalo de trinta dias para todos os subconjuntos, e para o cenário otimizado, onde a manutenção é realizada em intervalos ajustados para cada subconjunto.

CENÁRIOS

Cenário de man 1	30	7	30	14	30	14	30	14	30	14	30	14	30
Cenário de man 2	7	14	30	14	30	14	30	14	30	14	30	14	30

RESULTADOS

Controle MTTR	1.00	
Controle estoque (h)	2.00	
Total de horas de manutenção preventi		115.6
Total de horas de reparo		138.3
Total de horas de manutenção		253.9
Interrupção expedição (h)		48.2
Total de falhas		81.0

Componente	Quadro de comando			Recravador			Bicos de injeção de gás 1 e 2			Aplicador de etiquetas			Posicionador de embalagem			Bombas dosadoras		
	Dias após manut	Prob. falha	Falhas	Dias após manut	Prob. falha	Falhas	Dias após manut	Prob. falha	Falhas	Dias após manut	Prob. falha	Falhas	Dias após manut	Prob. falha	Falhas	Dias após manut	Prob. falha	Falhas
MTBF (dias)	17.5		24.4	26.8		32.9	41.3		44.4									
Theta (dias)	19.4		27.1	29.7		36.5	45.7		49.2									
Gamma	1.5		1.5	1.5		1.5	1.5		1.5									
N° falhas	24		13	8		8	7		7									
Hs reparo	52		17	14		8	21		12									

Dia	Quadro de comando			Recravador			Bicos de injeção de gás 1 e 2			Aplicador de etiquetas			Posicionador de embalagem			Bombas dosadoras volumétricas		
	TTR (h)	TTR (b)	TTR (h)	TTR (h)	TTR (b)	TTR (h)	TTR (h)	TTR (b)	TTR (h)	TTR (b)	TTR (h)	TTR (b)	TTR (h)	TTR (b)	TTR (h)	TTR (b)	TTR (h)	
1	1.92	3.08	2.46	1.11	2.47	2.72	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2	0.36																	
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
29																		
30																		
31																		
32																		
...																		

Figura 5 - Planilha de simulação resumida

TABELA 2 – Interrupção da expedição (h/ano) para o cenário de manutenção atual e otimizado

Cenário atual						Cenário otimizado					
MTTR relativo	Estoque de proteção (h)					MTTR relativo	Estoque de proteção (h)				
	0	0,5	1	1,5	2		0	0,5	1	1,5	2
1	124,7	97,3	75,5	59,9	46,8	1	92,4	71,7	55,5	43,6	33,6
0,85	106	79,1	59	45	32,4	0,85	78,6	58,2	43,1	32,6	22,9
0,7	87,3	61,1	43,3	30,2	18,8	0,7	64,7	44,9	31,5	21,6	13,1

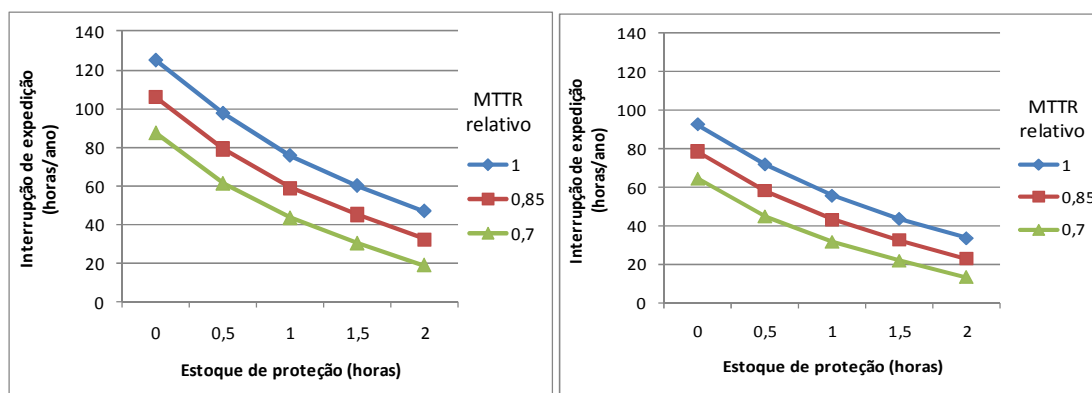


Figura 6 - Interrupção da expedição (h/ano) para o cenário de manutenção atual (esquerda) e otimizado (direita)

Observa-se na Tabela 2 que o cenário atual, com *MTTR* relativo igual a um e estoque de proteção de duas horas, gera uma estimativa de 46,8 horas de interrupção da expedição por ano. No cenário otimizado, existem três situações que asseguram desempenho similar ao cenário atual, porém com tamanho inferior do estoque de proteção:

- MTTR* relativo igual a um e estoque de proteção igual a 1,5 horas – desempenho estimado de 43,6 horas de interrupção de expedição por ano;
- MTTR* relativo igual a 0,85 e estoque de proteção igual a 1 hora – desempenho estimado de 43,1 horas de interrupção de expedição por ano;
- MTTR* relativo igual a 0,7 e estoque de proteção igual a 0,5 hora – desempenho estimado de a 44,9 horas de interrupção de expedição por ano.

Visto que a empresa deseja reduzir o estoque de proteção e está disposta a investir em treinamento e ferramentas para acelerar as atividades de reparo (reduzir *MTTR*), a opção mais indicada neste caso é c. Investindo na redução de 30% no tempo médio de reparo, é possível reduzir o estoque de proteção para apenas 30 minutos, mantendo o desempenho atual no que concerne a horas de interrupção da expedição.

A Figura 7 apresenta a comparação das horas totais de manutenção dos cenários atual e otimizado. Observa-se que, no cenário atual, são estimadas menos horas de manutenção preventiva e mais horas de manutenção corretiva ou reparo, o que resulta em aproximadamente 252 horas totais de manutenção por ano. No cenário otimizado, são estimadas mais horas de manutenção preventiva e menos horas de reparo, o que resulta em aproximadamente 227 horas totais de manutenção por ano. Para obter esses resultados estimou-se que a duração média de cada atividade de manutenção seria trinta minutos. Estes resultados estão de acordo com as premissas da realização de atividades de manutenção preventiva, onde se objetiva, além de prevenir danos para a empresa, reduzir o número total de horas de manutenções através da redução das horas de manutenção corretiva.

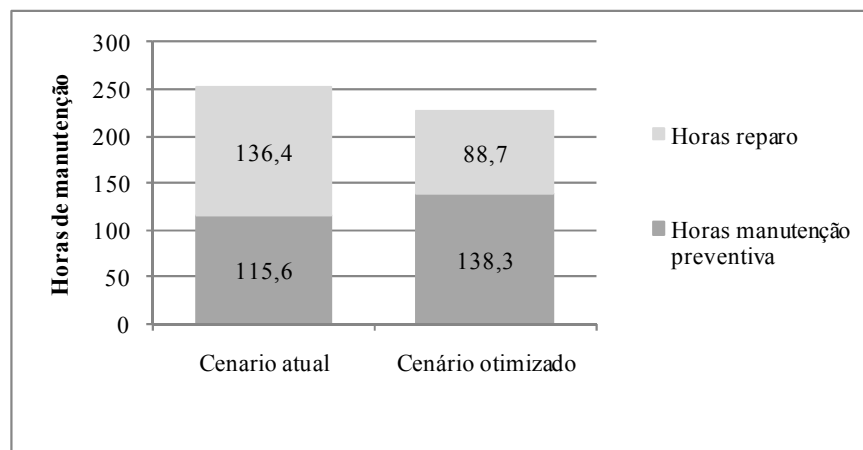


Figura 7 - Horas de manutenção estimadas para os cenários atual e otimizado (horas por ano)

CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção protegida por estoques. Cenários de produção protegida por estoques se caracterizam pela existência de estoques finitos, de forma que a linha de produção não é necessariamente interrompida pela quebra de um equipamento. Se o reparo for feito enquanto durar o estoque finito, a linha não é interrompida. Por outro lado, se o tempo de reparo for superior à folga que o estoque finito proporciona, então haverá parada de linha.

Após a identificação dos conjuntos e subconjuntos que influenciam a confiabilidade dos equipamentos estudados, estes foram classificados quanto ao efeito de suas falhas e correspondente criticidade. A seguir, foram identificadas a estratégia de manutenção e o

estoque de proteção atual, bem como foram levantados os tempos de bom funcionamento, tempos de reparo e disponibilidade dos subconjuntos identificados. Considerando as distribuições de probabilidade dos tempos de bom funcionamento e tempos de reparo, juntamente com a criticidade das falhas, definiu-se uma estratégia de manutenção otimizada, estabelecendo-se intervalos de inspeção ajustados para cada subconjunto. Posteriormente, foi realizada uma simulação da produção, falhas e manutenção, utilizando-se o método de Monte Carlo, a fim de estimar, através de métodos estocásticos, o número de paradas em cada cenário de manutenção (atual e otimizado), bem como as horas de manutenção, horas de parada de linha e horas de interrupção da expedição envolvidas. Na sequência, foi realizada uma análise de sensibilidade das horas de interrupção da expedição a eventuais variações no tamanho do estoque de proteção e no *MTTR*. Através dos resultados da simulação, estabeleceram-se recomendações referentes à melhor estratégia de manutenção, tamanho do estoque de proteção e metas para tempos médios de reparo.

O uso do Método de Monte Carlo permitiu a inclusão da variabilidade natural do sistema. A simulação possibilitou a análise da resposta do sistema a variações na estratégia de manutenção e *MTTR*. O estudo revelou que o cenário otimizado promove uma redução de cerca de 27% nas horas de parada de expedição, permitindo trabalhar com menores estoques de proteção, o que é conveniente para a empresa. O estudo também permitiu quantificar o efeito do *MTTR*, sendo que uma redução de 15% no *MTTR* promove uma redução de 21% nas horas de parada de expedição. Estes resultados auxiliam a empresa na tomada de decisão quanto à quantidade e ao tipo de investimentos em manutenção que permitem a redução do estoque de proteção sem, no entanto, que o sistema diminua seu desempenho.

Por fim, vale ressaltar as delimitações deste estudo. Este trabalho limitou-se ao estudo de um cenário produtivo, onde a produção é protegida por estoques e este deve compensar paradas devido à quebra de conjuntos. Não foram introduzidas no estudo variáveis relativas à demanda e a variabilidade do estoque de proteção. A solução deste problema exigiria uma abordagem diferenciada. O cenário com produção *Just in time*, por sua vez, é objeto de outro artigo em elaboração.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo fornecimento

de bolsa de pesquisa. Também agradecemos à empresa que permitiu a realização deste estudo colaborando com a disponibilização de informações.

REFERÊNCIAS

BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; GABRIELLI, R. Monte Carlo Simulation approach for a modified FMECA in a power plant. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 16, n. 4, p. 313-324, 2000.

BLOOM, N. B. *Reliability Centered Maintenance: implementation made simple*. New York, McGraw-Hill, 2006.

DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. Application of RCM to a medium scale industry. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 77, n. 1, p. 31-43, 2002.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Campus - Elsevier, 2009.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

HANSEN, R. C. *Eficiência Global dos Equipamentos: uma poderosa ferramenta de produção/manutenção para aumento dos lucros*. Porto Alegre. Bookman, 2006.

KIANFAR, A.; KIANFAR, F. Methodology and theory: plant function deployment via RCM and QFD. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 16, n. 4, p. 354-366, 2010.

LAFRAIA, J. R. B. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

NGUYEN, D. Q.; BRAMMER, C.; BAGAJEWICZ, M. New tool for the evaluation of the scheduling of preventive maintenance for chemical process plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 47, n. 6, p. 110-124, 2008.

NIU, G., YANG, B., PECHT, M. Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 95, n. 7, p. 786-796, 2010.

RAO, P. N., SRIKRISHNA, S., YADAVA, G. S. Reliability-centred maintenance applied to power plant auxiliaries. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 2, n. 1, p. 3-14, 1996.

RAUSAND, M. Reliability Centered Maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 60, n. 2, p. 121-132, 1998.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4 ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2005.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresenta inicialmente as conclusões da dissertação, e na sequência, são apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

5.1 Conclusões

O tema desta dissertação é a Manutenção centrada em Confiabilidade, abordada a partir de análises quantitativas. Seu objetivo principal é explorar análises quantitativas, utilizadas no âmbito da MCC, que possam contribuir na elaboração ou revisão de planos de manutenção. Para atingir os objetivos principal e específicos da presente dissertação, foram elaborados três artigos.

O primeiro artigo buscou analisar o tipo de suporte quantitativo que as empresas necessitam para a operacionalização da MCC. Após a revisão da literatura e identificação das principais atividades da MCC, foram realizadas entrevistas com os responsáveis pela manutenção em sete empresas manufatureiras, a fim de verificar a utilização dos métodos encontrados na literatura e identificar outros métodos.

O estudo da literatura, reforçado por entrevistas junto a profissionais de empresas do setor metal-mecânico, revelou que há oito métodos quantitativos importantes para sustentar a MCC. São eles: distribuições de probabilidade, diagrama de blocos e técnicas de análise de confiabilidade de sistemas, Simulação de Monte Carlo, métodos de Engenharia Econômica, *MRPII/MFT*, modelos estocásticos e determinísticos de gestão de estoques, *OEE/TEEP* e sistemas de custeio.

O segundo artigo contemplou o desenvolvimento de análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção *just in time*.

Através dos resultados da simulação da produção, falhas e manutenção, baseada no método de Monte Carlo, realizada para o cenário de crescimento da demanda previsto pela empresa, foi identificada a necessidade de melhorias na gestão da manutenção. O levantamento e as análises dos *MTBFs* e *MTTRs* dos subconjuntos permitiram, além da determinação de intervalos ótimos entre manutenções, a identificação de subconjuntos críticos e a escolha do tipo de ação mais adequada para melhorar seu desempenho. Subconjuntos com baixo *MTBF* necessitam de melhorias na política de manutenção, subconjuntos com alto *MTTR* necessitam de melhoria da capacitação e dos recursos da equipe de manutenção.

A simulação possibilitou a análise da resposta do sistema, quanto às horas de parada de máquina e comportamento das horas-extras para atender a demanda diária, considerando possíveis variações de demanda, *MTBF* e *MTTR*.

O terceiro artigo, por sua vez, contemplou o desenvolvimento de análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção protegido por estoques. Cenários de produção protegida por estoques se caracterizam pela existência de estoques finitos, de forma que a linha de produção não é necessariamente interrompida pela quebra de um equipamento.

Através dos resultados da simulação da produção, falhas e manutenção realizada, baseada no método de Monte Carlo, estabeleceram-se recomendações referentes à melhor estratégia de manutenção, tamanho do estoque de proteção e metas para tempos médios de reparo.

A simulação possibilitou a análise da resposta do sistema a variações na estratégia de manutenção e *MTTR*. O estudo revelou que o cenário otimizado promove uma redução de cerca de 27% nas horas de parada de expedição, permitindo trabalhar com menores estoques de proteção, o que é conveniente para a empresa. O estudo também permitiu quantificar o efeito do *MTTR*, sendo que uma redução de 15% no *MTTR* promove uma redução de 21% nas horas de parada de expedição.

O uso do Método de Monte Carlo no segundo e terceiro artigos permitiu a inclusão da variabilidade, natural do sistema, na simulação. A abordagem utilizada possui um caráter genérico e pode ser utilizada em empresas de manufatura que possuam equipamentos sujeitos à manutenção periódica. Os resultados obtidos através da abordagem utilizada nesta dissertação podem auxiliar as empresas na tomada de decisão quanto à necessidade, à quantidade e ao tipo de investimentos em manutenção que melhor atenderiam ao cenário de produção e demanda projetados

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do trabalho, foi possível identificar algumas sugestões para trabalhos futuros: (i) aprofundamentos relativos à implementação e operacionalização dos outros métodos quantitativos que suportam a MCC, em particular métodos que considerem a existência de redundância ativa e passiva; (ii) levantamento dos métodos quantitativos apropriados para serem utilizados na manutenção de empresas de setores de maior risco, como, por exemplo, os setores aeroespacial, nuclear e petroquímico; (iii) aplicação das metodologias desenvolvidas em outros cenários produtivos; (iv) estimação dos ganhos

monetários com a proposta de manutenção otimizada; (v) estimativa dos custos intangíveis associados à manutenção.

REFERÊNCIAS

BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; GABRIELLI, R. Monte Carlo Simulation approach for a modified FMECA in a power plant. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 16, p. 313-324, 2000.

BLOOM, N. B. *Reliability Centered Maintenance: implementation made simple*. New York, McGraw-Hill, 2006.

DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. Application of RCM to a medium scale industry. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 77, n. 1, p. 31-43, 2002.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Campus - Elsevier, 2009.

GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

MÁRQUEZ, A. C.; LÉON, P. M.; FERNÁNDEZ, J. F. G.; MÁRQUEZ, C. P.; CAMPOS, M. L. The maintenance management framework. A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 15, n. 2, p. 167-178, 2009.

NIU, G., YANG, B., PECHT, M. Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 95, n. 7, p. 786-796, 2010.

RAO, P. N., SRIKRISHNA, S., YADAVA, G. S. Reliability-centred maintenance applied to power plant auxiliaries. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 2, n. 1, p. 3-14, 1996.

RAUSAND, M. Reliability Centered Maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 60, n. 2, p. 121-132, 1998.

SANTOS, W. B.; COLOSIMO, E. A.; MOTTA, S. B. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. *Revista Gestão e Produção*, v. 14, n. 1, p. 193-202, 2007.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4 ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2005.

WILMETH, G. W., USREY, M. W. Reliability centered maintenance: a case study, *Engineering Management Journal*, v. 12, n. 4, p. 25-31, 2000.