

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ERIC EDWARD KÜNZEL

**MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA NA GESTÃO DE
MANUTENÇÃO: UM ESTUDO FEITO EM UMA INDÚSTRIA DO
SETOR DE BORRACHA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

ERIC EDWARD KÜNZEL

**MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA NA GESTÃO DE
MANUTENÇÃO: UM ESTUDO FEITO EM UMA INDÚSTRIA DO
SETOR DE BORRACHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Everton Luiz de Melo

PONTA GROSSA

2017



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ
CÂMPUS PONTA GROSSA
Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção



TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

Modelagem matemática aplicada na gestão de manutenção: um estudo feito em
uma indústria do setor de borracha

por

Eric Edward Künzel

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 25 de Setembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Everton L. de Melo
Prof. Orientador

Prof. Dr. Fábio Branco
Membro titular

Prof. Dr. Rui Tadashi Yoshino
Membro titular

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas pessoas que contribuíram de alguma forma para este trabalho. Em especial a meu orientador, Prof. Dr. Everton Luiz de Melo, pelo seu apoio e paciência.

A minha família pelo constante suporte e incentivo à busca das melhores oportunidades para minha vida.

A todos professores que acreditaram em mim e em meu potencial.

E a todos amigos que estiveram comigo em tempos difíceis, deixo aqui meu sincero reconhecimento.

*“Não é preciso ter olhos abertos para ver o sol,
nem é preciso ter ouvidos afiados para ouvir o trovão.
Para ser vitorioso, você precisa ver o que não está visível”.*
(TZU, Sun, 544-496 a. C.)

RESUMO

KÜNZEL, E. E. MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA NA GESTÃO DE MANUTENÇÃO: UM ESTUDO FEITO EM UMA INDÚSTRIA DO SETOR DE BORRACHA 2017. 68p. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

As operações de uma indústria têm uma grande dependência de seus equipamentos, sendo estes, muitas vezes, os principais responsáveis pelo seu processo produtivo. Para garantir o constante funcionamento do maquinário e a adequada qualidade desde a produção até o produto final é necessária a elaboração de um plano de manutenção eficaz. O maior desafio na gestão de manutenção é elaborar um planejamento que balanceie os custos nela envolvidos e que evite paradas não planejadas. Este estudo tem como intenção a abordagem de um problema de manutenção, tendo em vista a limitação de recursos e os custos envolvidos, através da programação linear inteira. Seu objetivo é utilizar e verificar o comportamento de um modelo existente, a fim de auxiliar na decisão de realizar a manutenção preventiva em uma parte da linha de produção de uma empresa do setor de borracha.

Palavras-chave: Gestão de Manutenção. Modelagem Matemática. Programação Linear Inteira. Manutenção Preventiva.

ABSTRACT

KÜNZEL, E.E. **MATHEMATICAL MODELLING APPLIED IN MAINTENANCE MANAGEMENT: A STUDY PERFORMED IN A RUBBER INDUSTRY.** 2017. 68p. Term Paper. Bachelor's Degree in Industrial Engineering – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2017.

The operations of an industry have an enormous reliability on its equipment, which play, mostly, a very important role in the organization's production process. To ensure the constant running of the machinery and the proper quality from the production to the product itself, the formulation of an effective maintenance plan is crucial. The biggest challenge in maintenance management is to elaborate a plan that controls maintenance expenses and prevents unplanned halts. This paper approaches a maintenance problem through integer linear programming, considering the resources limitation and costs involved. The main goal is to implement and verify an existing model, to support the decision-making of the preventive maintenance on a part of a production line in a rubber industry.

Keywords: Maintenance Management. Mathematical Modelling. Integer Linear Programming. Preventive Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipologias de manutenção	18
Figura 2 - Desenvolvimento de um modelo de PO	24
Figura 3 - Método para modelagem	26
Figura 4 - Exemplo de árvore de decisão.....	29
Figura 5 - Árvore de decisão	32
Figura 6 - Fluxograma de Metodologia.....	34
Figura 7 - Software Proconf.....	39
Figura 8 - TTFs do subsistema 9 no <i>software</i> Proconf	40
Figura 9 - Curva de confiabilidade do subsistema 9.....	41
Figura 10 - Distribuição lognormal.....	43
Figura 11 - Distribuição normal	43
Figura 12 - Distribuição exponencial	44
Figura 13 - Distribuição de Weibull.....	45
Figura 14 - Variação do Custo Esperado (intervalo quinzenal)	59
Figura 15 - Variação do Custo Esperado (intervalo mensal).....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de confiabilidade dos subsistemas (intervalo quinzenal e mensal)	42
Tabela 2 - Probabilidades de FL e FG	46
Tabela 3 - Médias de <i>downtime</i>	47
Tabela 4 - Custo médio de materiais para manutenções dos subsistemas (intervalo quinzenal).....	48
Tabela 5 - Custo médio de materiais para manutenções dos subsistemas (intervalo mensal)	48
Tabela 6 - Custos-hora para as respectivas manutenções (intervalo quinzenal) ..	50
Tabela 7 - Custos-hora para as respectivas manutenções (intervalo mensal)	51
Tabela 8 - Matriz de probabilidades de eventos (intervalo quinzenal).....	52
Tabela 9 - Matriz de probabilidades de eventos (intervalo mensal)	54
Tabela 10 - Matriz de custos de eventos (intervalo quinzenal)	55
Tabela 11 - Matriz de custos de eventos (intervalo mensal)	56
Tabela 12 - Resultados obtidos em diferentes testes (intervalo quinzenal)	58
Tabela 13 - Resultados obtidos em diferentes testes (intervalo mensal)	61

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	GESTÃO DA MANUTENÇÃO.....	16
2.2	TIPOS DE MANUTENÇÃO	17
2.2.1	Manutenção Corretiva	18
2.2.2	Manutenção Preventiva	18
2.2.3	Manutenção Preditiva	19
2.2.4	Manutenção Detectiva	20
2.2.5	Engenharia da Manutenção.....	20
2.3	CUSTOS DA MANUTENÇÃO.....	21
2.4	FERRAMENTAS DA MANUTENÇÃO.....	21
2.4.1	Manutenção Produtiva Total.....	22
2.4.2	Manutenção Centrada em Confiabilidade.....	22
2.4.2.1	Distribuição de Weibull	23
2.5	PESQUISA OPERACIONAL	23
2.5.1	Modelagem Matemática	25
2.5.2	Programação Linear	27
2.5.3	Programação Linear Inteira	28
2.5.4	Árvores de Decisão	29
2.6	MODELOS APLICADOS À GESTÃO DA MANUTENÇÃO	30
3.	DESENVOLVIMENTO	34
3.1	CLASSIFICAÇÃO E PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	34
3.2	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	35
3.3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO	35
3.4	UTILIZAÇÃO DO MODELO	36
3.5	BASE DE DADOS.....	39
3.5.1	Confiabilidade e Probabilidade de Falha	39
3.5.2	Probabilidades de falha leve e falha grave	45
3.5.3	Custos de Manutenção.....	46

3.5.4	Matriz de Probabilidades	52
3.5.5	Matriz de Custos Esperados.....	54
3.6	RESULTADOS E ANÁLISES	57
4.	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

A competitividade entre as organizações exige mudanças de visão e de paradigmas nas empresas. Em uma economia globalizada, a gerência deve se preocupar com a satisfação de seus clientes, que é consequência da qualidade de seu produto e de sua produção. A manutenção, como uma das partes fundamentais da produção, pode contribuir no rumo à excelência corporativa (PINTO, 2001).

É válido dizer que a participação da manutenção no sistema produtivo é importante, devido à constante necessidade da disponibilidade de máquinas para atender à demanda de clientes cada vez mais inflexíveis. Através de um eficiente planejamento da manutenção, é possível aumentar a disponibilidade de equipamentos e instalações, além de manter a qualidade dos produtos produzidos (PINTO; XAVIER, 2009).

A busca por melhorias na área de manutenção surgiu durante os tempos de guerra, quando a ociosidade de equipamentos era uma desvantagem. Desde então foram desenvolvidas técnicas para elaboração de ações preventivas, rotinas de lubrificação, troca de componentes em dados períodos, entre outras atividades a fim de melhorar o rendimento da manutenção (VIANA, 2002).

Além disso, uma empresa que não zela pela sua manutenção e falha ao gerenciar suas atividades mantenedoras está fadada a ter maiores custos operacionais, um número elevado de paradas em sua produção e um ambiente inseguro para se trabalhar. Pinto (2009) afirma que a manutenção não deve estar somente focada na revitalização de equipamentos, mas sim na redução de possíveis falhas futuras.

A união de ferramentas de outras áreas, como da Engenharia da Qualidade e da Pesquisa Operacional (PO), permitiram uma abordagem diferenciada em problemas de planejamento de manutenção. Exemplos de ferramentas da Qualidade são *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) e *Fault Tree Analysis* (FTA). Como ferramentas de PO pode-se citar modelagem matemática e simulação.

A PO, em particular, engloba técnicas de modelagem matemática que podem ser usadas para representar situações reais de sistemas e assim encontrar condições mais favoráveis de funcionamento para o cenário interpretado. A quantidade de variáveis e restrições que podem estar impostas em uma representação sistêmica de

um problema real cria a necessidade de utilização de recursos computacionais para sua solução (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Dekker (1996) define modelos de otimização da manutenção como aqueles que procuram encontrar um equilíbrio entre os custos e benefícios da manutenção. Dekker (1996, p. 3) define que modelos para melhoria de manutenção podem englobar:

- A descrição do sistema técnico, sua função e importância;
- Um modelo de deterioração do sistema em tempo e possíveis consequências;
- Uma descrição do sistema e possíveis ações para seu gerenciamento; e
- Uma função objetivo e uma técnica de otimização que auxilia na busca de um ponto ótimo.

Desta maneira, partindo do princípio no qual são extremamente significantes a disponibilidade de máquinas e a minimização de custos de manutenção, propõe-se a aplicação de um modelo matemático para otimizar esse cenário dentro uma empresa do setor de borracha e auxiliar no planejamento da manutenção de uma parte da sua linha de produção.

A presente pesquisa tem como ponto de partida descobrir como otimizar a manutenção em uma fábrica, considerando a alocação de recursos, a fim de minimizar o tempo parado por manutenção preventiva e por paradas inesperadas.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho, tanto o geral quanto os específicos, serão apresentados a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Otimizar o planejamento da manutenção através da modelagem matemática, que representará de certa forma uma situação de um sistema estudado, de modo a auxiliar na tomada de decisão para realização de manutenção.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja atingido é necessário que os seguintes objetivos específicos sejam alcançados:

- i)** Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre os conceitos envolvidos e modelos utilizados para gestão da manutenção;
- ii)** Analisar dados de manutenção de um possível cenário;
- iii)** Utilizar um modelo que se encaixe na situação analisada;
- iv)** Validar os resultados obtidos pelo modelo; e
- v)** Obter melhorias no planejamento de manutenção.

1.2 JUSTIFICATIVA

A garantia de funcionamento de máquinas e sistemas em seu ciclo de vida e a não redução da performance são propósitos das áreas de manutenção e operação. Desta forma, em um ambiente onde as mudanças ocorrem velozmente, a manutenção deve agir de maneira antecipatória a fim de suprir essas transformações na economia (PINTO, 2009).

A manutenção, quando não planejada adequadamente, pode ser uma fonte considerável de custos. Seu eficiente e eficaz planejamento permite à organização evitar paradas desnecessárias de produção que acarretam custos operacionais e gerenciar seus recursos de manutenção de melhor forma.

Além disso, a qualidade do produto não é consequência somente de um projeto bem elaborado, mas também de seu processo produtivo. As atividades de manutenção providenciam maior disponibilidade e conservam ou melhoram o rendimento da produção, se forem realizadas da maneira correta.

Deve ser ressaltado que este trabalho não tem como intenção prover o resultado para a empresa, pois se trata somente de um estudo com dados reais que tem como ênfase a aplicação do conhecimento obtido ao longo do curso de Engenharia de Produção.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado conforme segue. No Capítulo 1 são apresentados a introdução, os objetivos, a justificativa para realização desta pesquisa assim como sua estruturação.

O Capítulo 2 contém a revisão bibliográfica, que aborda os principais conceitos abordados nesse trabalho das áreas de Gestão de Manutenção e PO.

O terceiro capítulo descreve o desenvolvimento do trabalho como um todo, abrangendo a metodologia e etapas de pesquisa adotadas, o sistema a ser tratado, explicação de como os dados foram obtidos, as considerações tomadas e os resultados e análises para o problema estudado.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta a conclusão da situação analisada, assim como sugestões e pontos a serem considerados futuramente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o propósito de explicar os principais conceitos de PO e de manutenção que serão envolvidos neste trabalho, a fim de fornecer um embasamento teórico para melhor esclarecimento dos temas abordados.

2.1 GESTÃO DA MANUTENÇÃO

Em um ambiente capitalista, onde o avanço dos instrumentos de produção e de comunicação ocorre de forma acelerada, as empresas procuram diferentes formas para não perder espaço em um mercado competitivo. Por isso, adquirir equipamentos de ponta, definir padrões de qualidade rigorosos, desenvolver produtos concorrentes e planejar eficientemente a manutenção são medidas importantes a serem consideradas para sobreviver nesse contexto (VIANA, 2002).

Por muito tempo vista como um empecilho para a produção, a manutenção evoluiu até o ponto de ser considerada uma área fundamental da atividade industrial. Aspectos como desempenho produtivo, segurança, qualidade do produto, e eficiência do processo produtivo estão fortemente ligados à essa área (CABRAL, 2006).

Antigamente o objetivo da manutenção era recondicionar o equipamento ou o sistema para seu estado original de funcionamento. Depois sua função passou para a garantia de disponibilidade de equipamentos e instalações para que pudessem produzir um bem ou serviço considerando aspectos relacionados a confiabilidade, meio ambiente, segurança e otimização de custos (PINTO, 2001).

De acordo com Monchy (1989, p. 3) a palavra manutenção surgiu no vocabulário militar com o significado “manter, nas unidades de combate, o efetivo e o material num nível constante”. Viana (2002) afirma que a manutenção se tornou uma necessidade durante a Segunda Guerra Mundial, período no qual métodos de organização, planejamento e controle para tomada de decisão estavam sendo desenvolvidas.

A gestão de manutenção é o conjunto das atividades que definem objetivos, estratégias e responsabilidade da manutenção e que as implementa através do planejamento, controle e supervisão da manutenção e melhorias dos métodos organizacionais, incluindo aspectos econômicos (Norma Europeia – CEN, 2001, p. 5)

Com o decorrer do tempo e a evolução da tecnologia, a exigência pela disponibilidade de equipamentos e instalações passou a ser maior. Por isso, as técnicas de gestão tiveram uma considerável progressão para poder assim auxiliar as operações produtivas (VIANA, 2002).

A manutenção industrial está diretamente ligada ao processo produtivo, e seus objetivos devem estar alinhados aos da empresa como um todo. Porém, o custo da manutenção deve ser analisado juntamente com seu benefício, e o desafio é descobrir um ponto de equilíbrio entre ambos. Desta forma, Cabral (2006, p. 2) definiu a gestão da manutenção como “conjunto de ações destinadas a encontrar e situar o nível de manutenção neste ponto de equilíbrio”.

2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

A manutenção pode ser caracterizada pela forma de que é feita a intervenção em um equipamento ou sistema. Muitos autores abordam os métodos de manutenção, e nem sempre da mesma maneira (VIANA, 2002).

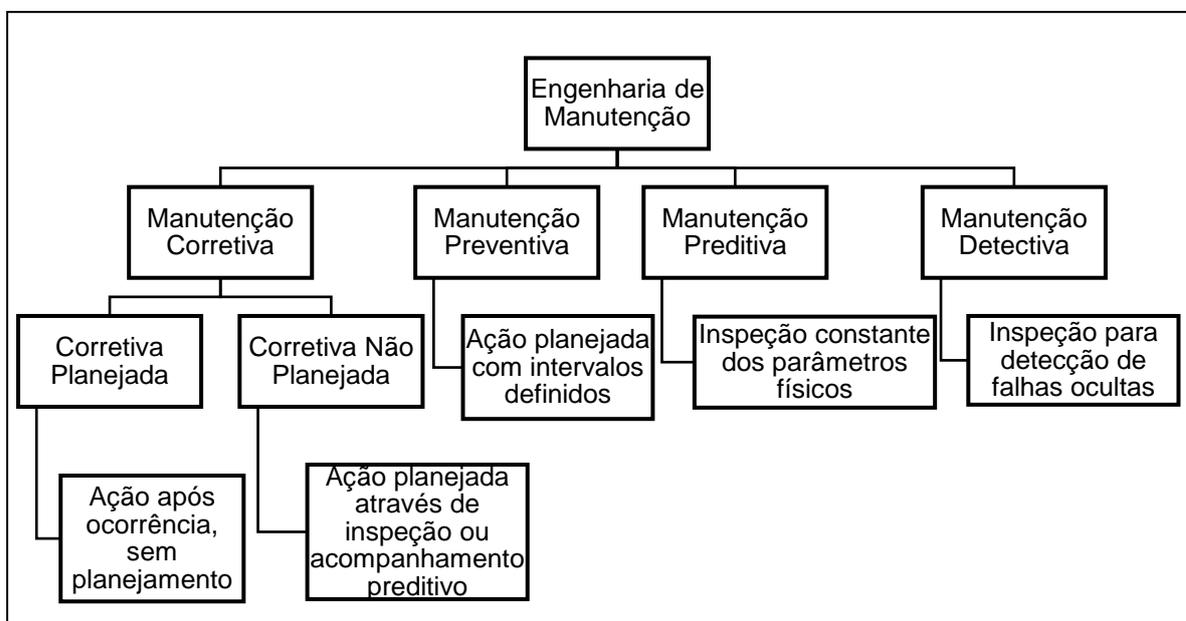
Segundo Pinto e Xavier (2009) os tipos de atividade de manutenção podem ser classificados da seguinte maneira:

- Manutenção Corretiva;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Preditiva;
- Manutenção Detectiva; e
- Engenharia da Manutenção.

Cada método possui suas vantagens e desvantagens, porém as combinações entre eles podem definir uma melhor abordagem para tratar uma certa criticidade em uma máquina. Existe também uma ligação entre a escolha do tipo de manutenção do equipamento e as consequências das falhas de componentes, que poderiam estar relacionadas à segurança, à qualidade e ao rendimento da produção (XENOS, 1998).

O esquema da Figura 1 ilustra os tipos de manutenção e suas devidas aplicações.

Figura 1 - Tipologias de manutenção



Fonte: Adaptado de Pinto (2009)

2.2.1 Manutenção Corretiva

É a intervenção realizada após a ocorrência de uma falha. Essa forma de manutenção requer uma consideração em relação ao custo-benefício, pois é possível que uma ação preventiva tenha maior custo do que a corretiva (XENOS, 1998).

Para Pinto e Xavier (2001, p. 36), a manutenção corretiva é “a atuação para a correção da falha ou do desempenho menor que o esperado”. Os autores dividem esse tipo de manutenção em duas partes, a Manutenção Corretiva Planejada e a Não Planejada. A primeira é feita por decisão gerencial, através de análises de questões de segurança, produção e custos. A segunda é realizada após uma falha aleatória.

2.2.2 Manutenção Preventiva

Segundo Viana (2002), é possível categorizar de preventiva toda manutenção feita em máquinas que estão aptas a operar ou estão em perfeito estado. A manutenção preventiva é realizada em períodos pré-definidos ou através de critérios estabelecidos.

Apesar de nem sempre ser tão barata quanto uma Manutenção Corretiva Planejada, a manutenção preventiva muitas vezes se torna mais conveniente, do ponto de vista do custo total. Com a queda da quantidade de paradas imprevisíveis e o aumento do tempo disponível dos equipamentos, a produção terá mais chances de fluir ininterruptamente (XENOS, 1998).

De acordo com Pinto e Xavier (2001), existem alguns fatores a serem avaliados antes de implantar uma política de manutenção preventiva:

- Quando a manutenção preditiva não é aplicável;
- Caso a segurança, seja pessoal ou da instalação, esteja comprometida;
- Oportunidade de atuar em uma máquina em estado crítico e que seja crucial para o processo produtivo;
- Quando há risco para o meio ambiente; e
- Sistemas de produção contínua e/ou de maior complexidade.

A manutenção preventiva será tanto mais conveniente quanto maior for a simplicidade na reposição, quanto mais altos forem os custos de falhas, quanto mais as falhas prejudicarem a produção e quanto maiores forem as implicações das falhas na segurança pessoal e operacional (Pinto e Xavier (2001, p. 41).

2.2.3 Manutenção Preditiva

Nesse método de manutenção é possível determinar de melhor forma a troca ou o reparo de componentes através do monitoramento do limite de ciclo de vida das peças. Apesar do fato de que sua aplicação seja restringida pelo tipo de peça ou de máquina, suas atividades fazem parte do plano de manutenção preventiva, que por sua vez elabora ações preventivas através de dados e análises preditivos (XENOS, 1998).

“O objetivo de tal tipo de manutenção é determinar o tempo correto da necessidade da intervenção mantenedora, com isso evitando desmontagens para inspeção, e utilizar o componente até o máximo de sua vida útil ” (VIANA, 2002, p. 12).

Pinto e Xavier (2001) definiram as seguintes circunstâncias para aplicação desse tipo de manutenção:

- Deve ser possível realizar o acompanhamento de uma máquina ou sistema;
- De acordo com os custos implicados, toma-se a decisão para adoção dessa manutenção em certas máquinas ou sistema;
- Os motivos das falhas podem ser monitorados e acompanhados; e
- Um procedimento deve ser formalizado para monitoramento, e *check-up* contínuo.

2.2.4 Manutenção Detectiva

“Manutenção Detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e de manutenção” (PINTO; XAVIER, 2009).

Segundo Pinto (2001), essa detecção de falhas não visíveis a olho nu ou difíceis de perceber são essenciais para garantir a confiabilidade de um equipamento, sendo somente adequada sua utilização para colaboradores capacitados através de treinamentos.

Lafraia (2001) cita os seguintes exemplos que utilizam a aplicação da manutenção detectiva:

- Inspeções em bombas de incêndio;
- Teste de fornos e caldeiras;
- Testes de emergência em sistemas de vasos de pressão;
- Testes em detectores de gás de fumaça e incêndio; e
- Testes em válvulas dos mais variados tipos.

2.2.5 Engenharia da Manutenção

Esse conceito trata do conjunto de técnicas, práticas, rotinas, análises e acompanhamentos da manutenção como um todo. É uma introdução de um novo modelo que busca a melhoria contínua dos métodos de análise, execução e monitoramento da manutenção (PINTO, 2009).

Essa área tem como objetivo promover o progresso tecnológico da Manutenção, através da aplicação de conhecimentos científicos e empíricos na solução de dificuldades encontradas no processo e equipamentos, perseguindo a melhoria da manutenibilidade das máquinas, maior produtividade, e a eliminação de riscos à segurança do trabalho e ao meio ambiente (Viana, 2002, p. 82).

2.3 CUSTOS DA MANUTENÇÃO

Anteriormente não se conheciam as formas de se controlar os custos da manutenção e se acreditava que a manutenção representava custos muito altos. Com a intenção de melhor manejo, foi possível classificar esses custos, segundo Pinto (2009), da seguinte forma:

- Custos Diretos: custos que são originados nas atividades diretamente relacionadas às ações para manter as máquinas funcionando. São constituídos dos custos de mão de obra interna e externa, e de materiais;
- Custos Indiretos: são associados ao investimento no setor de manutenção, seja para alguma melhoria ou diagnóstico, também aos recursos administrativos e de supervisão, entre outros; e
- Custos de Perda de Produção: provenientes das falhas seja por manutenção incorreta, ou por falta de oportunidade de substituição de maquinário.

Os custos de manutenção são uma fração dos custos produtivos de uma empresa. Para realizar e planejar as atividades mantenedoras são necessários recursos como: energia, mão de obra tanto própria quanto subcontratada, materiais sobressalentes e de consumo, entre outros. O escopo de lucro das empresas pode ser prejudicado caso o custo não seja proporcional ao efeito da manutenção (XENOS, 1998).

2.4 FERRAMENTAS DA MANUTENÇÃO

Para Pinto e Nascif (2009), existem algumas ferramentas que adotam conceitos e princípios dos tipos de manutenção e auxiliam no controle de suas atividades, e as principais ferramentas serão mencionadas na sequência.

2.4.1 Manutenção Produtiva Total

A Manutenção Produtiva Total (MPT), ou do inglês *Total Productive Maintenance* (TPM), teve sua origem no Japão, e segundo Davis (1995, apud Fogliatto, 2009) pode ser considerada uma filosofia, uma coleção de práticas e técnicas destinadas a maximizar a capacidade dos equipamentos e processos utilizados pela empresa”.

Segundo Fogliatto (2009), a TPM é constituída pelos seguintes elementos:

- Mudança de cultura a fim de melhorar o rendimento das máquinas;
- Introdução de um sistema para prevenção de falhas que possam afetar os equipamentos e o local de trabalho;
- Integração dos demais departamentos;
- Abranger colaboradores familiares com a filosofia *Kaizen*, desde alta gerência até níveis hierárquicos mais baixos; e
- Capacitação dos colaboradores através de treinamentos e educação.

Para Pinto (2009), o propósito da TPM é aumentar a qualificação das pessoas e melhorar as práticas de manutenção. Tudo isso ao atribuir conceitos como “minha máquina, meu problema”, além de apoiar a integração de homem, empresa e equipamentos, e afirmar que o cuidado com os meios produtivos deve ser responsabilidade de todos.

2.4.2 Manutenção Centrada em Confiabilidade

Fogliatto (2009) afirma que a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) é composta de técnicas que garantem que a operação de uma empresa continue funcionando. Com base em conhecimentos de engenharia, essa ferramenta permite à empresa aprimorar suas atividades de manutenção, reduzir falhas, acidentes e consertos.

De acordo com Xavier e Nascif (2009, p. 140), a MCC “é uma metodologia que estuda um equipamento ou um sistema em detalhes, analisa como ele pode falhar e define a melhor forma de fazer manutenção de modo a prevenir a falha ou minimizar as perdas decorrentes da falha”.

Através de análises e estudos, a MCC pretende monitorar tipos de falhas possíveis entre peças, e desenvolver uma ação para evitar essas falhas no futuro.

Seu time deve ser constituído de representantes das mais diversas áreas que envolvem o sistema a ser analisado e um especialista técnico que conduzirá o time nas aplicações e demais procedimentos da MCC (VIANA, 2002).

A formação de equipes de trabalho geralmente abrange de quatro a seis pessoas por equipe, e deve incluir um facilitador, um operador do equipamento ou sistema a ser analisado, um engenheiro, um mecânico e um eletricitista que tenham conhecimento da máquina ou sistema abordado. Além disso, a equipe precisa ter total apoio de seu líder, que por sua vez deve acreditar nos princípios da MCC e praticá-los (FOGLIATTO, 2009).

2.4.2.1 Distribuição de Weibull

Fogliatto (2009) afirma que em termos de modelagem de confiabilidade, a principal distribuição utilizada é a de Weibull. Isso se deve à sua variabilidade e também à possibilidade de representar amostras com diferentes comportamentos de tempos até falha ou *Time to Fail* (TTF). Além disso, essa distribuição pode ser utilizada com amostras de pequeno tamanho para, ainda assim, se obter um resultado razoável em uma análise. Tal distribuição é amplamente utilizada no campo de pesquisa de gestão da manutenção.

2.5 PESQUISA OPERACIONAL

Assim como a gestão da manutenção, a PO também teve seu início na Segunda Guerra Mundial. Devido à priorização do envio de recursos para lugares desprovidos durante operações bélicas, os estrategistas viram a necessidade de utilizar diferentes técnicas para resolver problemas táticos e formular novas estratégias (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

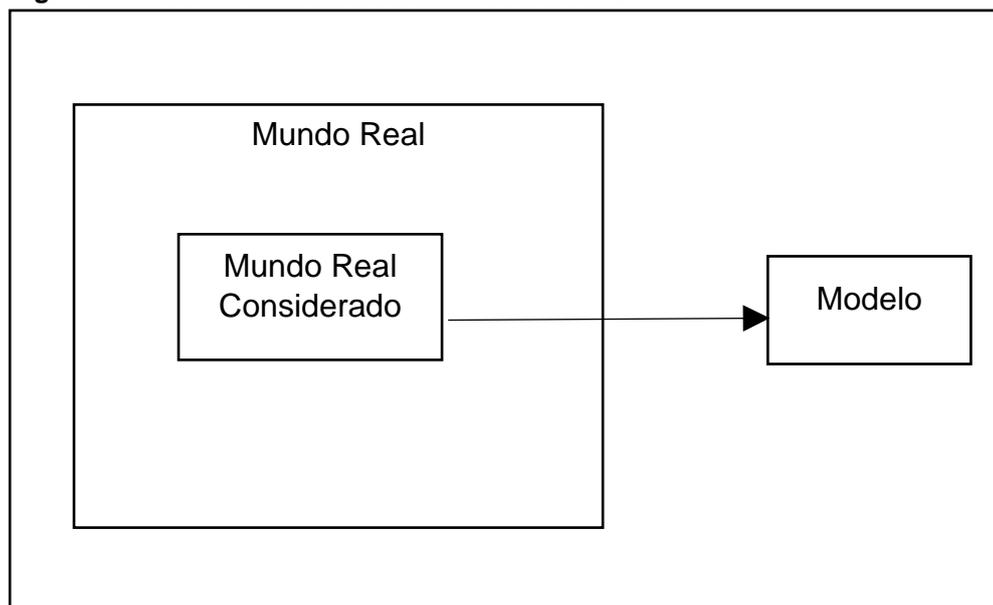
Ainda segundo Hillier e Lieberman (2006), devido ao avanço da tecnologia computacional, a PO teve um crescimento significativo, visto que a grande quantidade de cálculos e iterações dificultavam as resoluções feitas à mão. As técnicas de PO já haviam feito progresso no período pós-guerra, como por exemplo com o surgimento do método *simplex*, que resolvia problemas de programação linear.

A PO utiliza principalmente a modelagem matemática e simulações para representar problemas reais e encontrar uma solução ótima para eles. Segundo Taha

(2008), o tipo de modelo matemático a ser utilizado irá determinar a forma de se encontrar a solução. Essas soluções, inclusive as soluções ótimas, são calculadas por algoritmos, que realizam repetições (ou iterações) a fim de atingir a melhor solução possível para o problema abordado, respeitando as suas restrições.

A Figura 2 representa os níveis para formular um modelo.

Figura 2 - Desenvolvimento de um modelo de PO



Fonte: Adaptado de Taha (2008)

Conforme a Figura 2, pode-se notar que um modelo matemático é derivado de uma “adaptação” de uma situação encontrada no mundo real. Formular modelos que representem uma situação real de maneira exata pode ser uma atividade exigente, senão impossível, se levar em conta a quantidade de variáveis e a complexidade para representá-las matematicamente.

Por mais eficiente que seja a utilização de técnicas de formular modelos matemáticos para resolução de problemas reais, se o problema não for devidamente estudado e representado, a solução só será considerada “a” melhor solução unicamente para aquele modelo (TAHA, 2008).

Muitos autores descrevem as etapas que constituem uma abordagem de estudo utilizando a PO, e geralmente chegam a um conjunto de passos em comum. Segundo Taha (2008), essas etapas são as seguintes:

- 1) Formular o problema:** deve-se esclarecer e detalhar o problema para entender suas condições e limites. Os objetivos a serem encontrados

devem ser especificados para que se encontre alternativas para solucionar o problema. Se trata basicamente da descrição textual do problema;

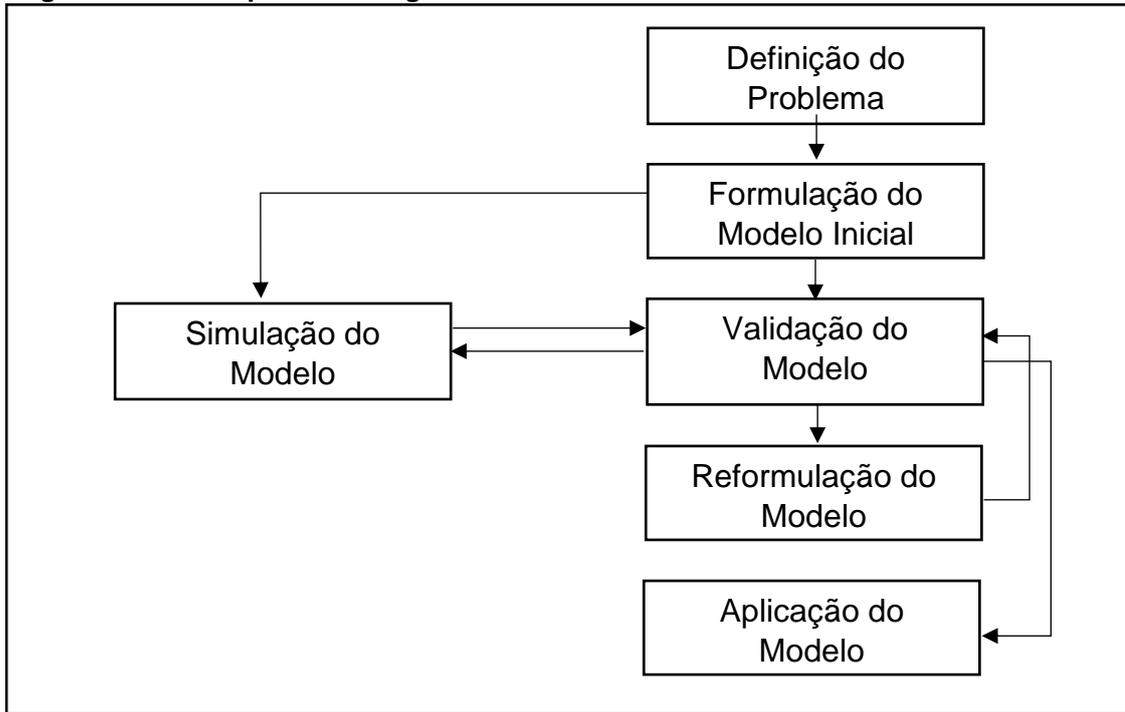
- 2) **Representar o modelo:** consiste na transformação do problema em equações matemáticas;
- 3) **Solucionar o modelo:** utiliza-se algoritmos de aprimoramento para encontrar a solução e verificar como o modelo se comporta em relação às restrições impostas;
- 4) **Validar o modelo:** verificar se há coerência entre a solução que o algoritmo permite encontrar e o objetivo formulado. É possível considerar a comparação com dados históricos para verificar o desempenho do modelo; e
- 5) **Implementar os resultados:** conversão dos resultados obtidos através do modelo em orientações para as pessoas que estão envolvidas no sistema real estudado.

Na sequência serão explicados os conceitos da formulação de um modelo matemático para um problema de programação linear.

2.5.1 Modelagem Matemática

Golbarg e Luna (2005) descrevem a PO como uma área que engloba as mais distintas técnicas para modelar problemas matematicamente. Podem ser desenvolvidos modelos lógicos que representam matematicamente sistemas e que tem como propósito encontrar as melhores soluções para as circunstâncias interpretadas. A Figura 3 apresenta um fluxograma que ilustra o método para desenvolver modelos.

Figura 3 - Método para modelagem



Fonte: Adaptado de Golbarg e Luna (2005)

A Programação Matemática (PM), que envolve a modelagem matemática, pode ser denominada otimização por geralmente ser aplicada a situações onde é necessário utilizar os recursos de forma efetiva para se atingir o escopo de uma organização ou de uma pessoa. Ragsdale (2009) ainda declara que a PM é constituída por três itens:

- Decisões: os elementos decisórios de um modelo matemático são representados por variáveis, que podem descrever, por exemplo, a quantidade de recursos, o lucro por unidade vendida de um produto ou a quantidade de elementos no estoque;
- Restrições: não são nada mais que funções ou equações que impõem uma utilização mínima, máxima ou exata de recursos, produtos ou qualquer elemento que o modelo englobe; e
- Objetivo: a função objetivo de um modelo pode ser de maximização ou minimização, e envolve as variáveis de decisão para estes fins.

Para ficar mais claro, o modelo a seguir, adaptado de Ragsdale (2009), mostra uma forma geral de representar uma situação de otimização:

$$\text{MAX ou MIN: } f_0(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$f_1(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq b_1 \quad (2)$$

⋮

$$f_k(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq b_k \quad (3)$$

⋮

$$f_m(X_1, X_2, \dots, X_n) = b_m \quad (4)$$

A função objetivo, Equação (1), procura maximizar ou minimizar a função que envolve as variáveis X_i . A solução deve respeitar as restrições que impõe limites de alguns recursos, Equações (2) e (3), que tem k funções para representar a limitação de um mesmo número k de recursos. A Equação (4) ilustra a restrição de uso exato de recursos disponíveis, dessa vez representados pela letra m para diferenciar-se da restrição anterior.

2.5.2 Programação Linear

Hillier e Lieberman (2006) afirmam que na programação linear (PL) o problema tratado é composto por funções lineares, e o termo “programação” não está necessariamente ligado à área computacional, mas sim à área de planejamento. O meio computacional será utilizado para realizar as iterações e facilitar os cálculos para encontrar a solução ótima para o problema.

Taha (2008) complementa que para um modelo ser considerado de PL, deve atender os seguintes requisitos:

- Proporcionalidade: as variáveis utilizadas no modelo devem ter seu peso diretamente equivalente ao valor que podem assumir;
- Aditividade: as variáveis que estão na função objetivo e restrições devem juntas contribuir como um todo para suas respectivas propriedades, ou seja, deve ser possível realizar a adição de cada atividade para resultar em uma contribuição total; e
- Certeza: esse requisito envolve o uso de variáveis determinísticas, no qual se tem certeza dos valores assumidos por essas variáveis.

Segundo Silva (1998), PL é uma das maneiras mais empregadas para abordar problemas de PO. A linearidade simplifica a representação do modelo e os recursos

computacionais facilitam sua aplicação, sendo empregada em áreas de alocação de recursos, finanças e manufatura, por exemplo.

O principal foco deste trabalho será a abordagem de problemas de Programação Linear Inteira (PLI), que terá seus principais conceitos explicados a seguir.

2.5.3 Programação Linear Inteira

Hillier e Lieberman (2008) relacionam a formulação do modelo matemático de *programação linear* com *programação inteira*, que são basicamente similares exceto pela condição de que as variáveis devem assumir valores inteiros. Porém existem situações nas quais não necessariamente todas variáveis precisam ser inteiras, dando assim origem à característica *mista*, que mistura variáveis inteiras e de outra tipologia como binária, por exemplo.

Existe uma vasta quantidade de problemas reais que envolvem variáveis cujos valores não poderiam ser contínuos, como por exemplo, a decisão da quantia de caminhões a se utilizar para o transporte de determinada quantidade de mercadorias. Neste caso não é possível trabalhar com valores fracionados, como um caminhão e meio. Porém existe a possibilidade de se aplicar um relaxamento, que consiste em considerar as variáveis como contínuas ao invés de inteiras. O algoritmo *Branch and Bound*, por exemplo, relaxa as condições de integralidade para encontrar soluções sub-ótimas, de acordo com cada situação analisada de relaxamento (RAGSDALE, 2009).

Os problemas de programação inteira mais relevantes, em geral, são classificados como NP-Difíceis. Quando um problema é classificado como NP-Difícil, significa que não são conhecidos métodos exatos que o resolvam em tempo computacional aceitável.

Cormen et al (2002) argumentam através do problema do ciclo hamiltoniano de que encontrar uma solução possível para um problema de programação linear inteira em tempo polinomial é impossível, pois se trata de um problema de classe NP-difícil (NP é uma abreviação para o termo inglês "*nondeterministic polynomial*").

2.5.4 Árvores de Decisão

Geralmente decisões complexas são possíveis de serem divididas em porções menores para serem resolvidas. Utilizando a árvore de decisão, é possível encontrar soluções satisfatórias para tomadas de decisão. Winston (2004) mostra na construção de um exemplo que a árvore é composta por nós de decisão e de eventos, que geram possíveis efeitos.

Os nós de decisão representam a tomada de decisão, que pode estar, por exemplo, associada a realizar ou não uma manutenção. Os nós de eventos ocorrem quando forças externas influenciam a ocorrência de diferentes resultados, cada um com sua própria probabilidade. A Figura 4 representa um exemplo esquemático de árvore decisiva:

Figura 4 - Exemplo de árvore de decisão



Fonte: Adaptado de Picanço et al (2015)

Quinlan (1986) realiza um estudo sobre indução de árvores de decisão e descreve uma abordagem de sintetização de árvores de decisão. O autor comenta que a essência da indução é ir além do espaço analisado, observando itens ocultos através de uma árvore de decisão que demonstre a principal relação entre uma classe de objeto e os valores de seus atributos.

Vale (1999) descreve a árvore de decisão como uma representação visual de uma dificuldade enfrentada, que demonstra as possibilidades decisivas, as consequências aleatórias que podem acontecer e os resultados a elas associados.

Na seção seguinte será apresentado um exemplo de aplicação de árvores de decisão na tomada de decisão em manutenção, esclarecendo o uso desses conceitos.

2.6 MODELOS APLICADOS À GESTÃO DA MANUTENÇÃO

Diversos trabalhos utilizaram a modelagem matemática para abordar problemas de manutenção. Wagner (1964) propõe cinco modelos, cada um com seu próprio critério de gerenciamento de mão de obra. Ele ainda afirma que um típico objetivo de agendamento de manutenção preventiva procura a definição de um período para se cumprir a manutenção e considerar a minimização da variação da necessidade de operadores.

Kay (1976) fez uso da distribuição de Weibull de um parâmetro para representar o tempo médio até a falha, *Mean Time To Fail* (MTTF), de um equipamento através de um modelo de manutenção. Sachdeva et al (2008) seguiram esse mesmo modelo para elaborar uma estrutura de otimização multicritério para definição de um período ótimo para manutenção, considerando ociosidade de máquinas, custos de manutenção e custos do ciclo de vida de equipamentos.

Das et al (2007) apresentaram um modelo para planejamento da manutenção preventiva utilizado em sistemas de manufatura celulares, que leva em consideração a confiabilidade dos equipamentos e o uso de recursos.

Grigoriev et al (2006) estudam o Problema de Manutenção Periódica (PMP), que busca minimizar custos operacionais e de serviço através de uma periodicidade de manutenção cíclica. O trabalho sugere diferentes modelos para abordar o PMP de maneiras diversas e computar soluções ótimas.

Na abordagem de problemas de PLI pode-se ressaltar um método utilizado por Manzini et al (2015) que utilizaram um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) baseado em restrições de custo, confiabilidade e recursos para definir o planejamento da manutenção preventiva. Este trabalho foi baseado na pesquisa feita por Alardhi e Labib (2008), que utilizaram o PLIM para determinar o tempo apropriado

para realizar manutenção preventiva em plantas de cogeração, que produzem energia elétrica e água dessalinizada.

Picanço et al (2015) sugeriram um modelo de PLI para tomada de decisão de manutenção de um terminal logístico de açúcar considerando restrições de orçamento. O modelo foi construído em base de uma árvore de decisão, que foi determinada através de dados de confiabilidade e custos dos equipamentos envolvidos.

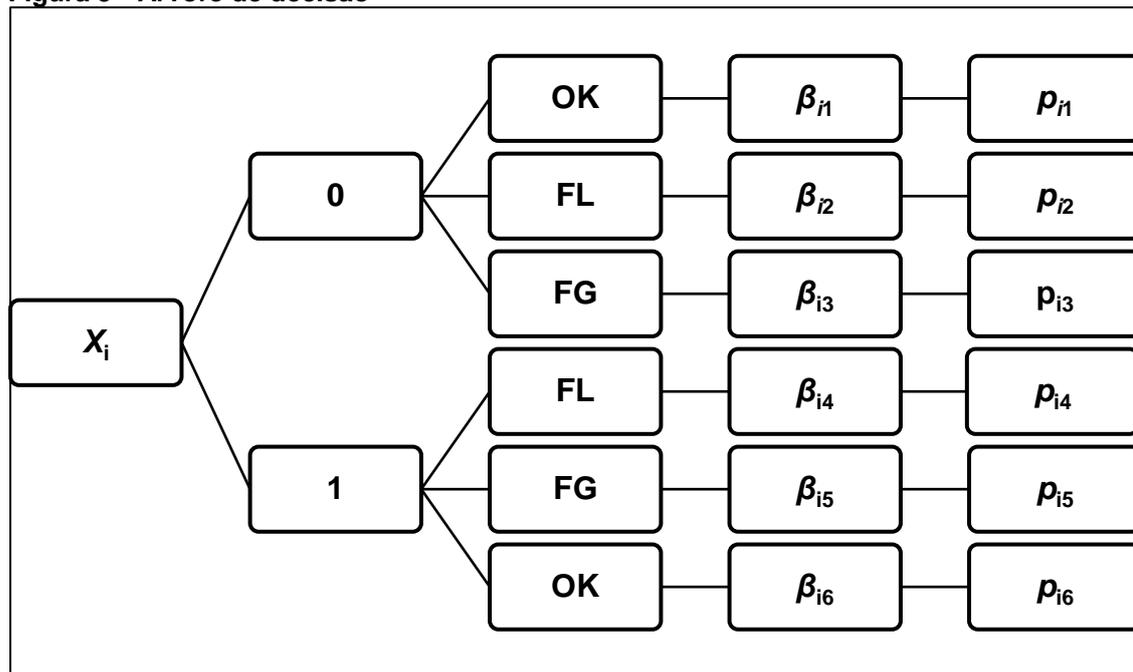
O modelo deste trabalho será fundamentado no modelo de PLI anteriormente citado, pelo fato de envolver conceitos que mais se aproximam de uma situação real, como o de limite de orçamentos para manutenção e dados de confiabilidade e probabilidade de falha.

Inicialmente no modelo base, foram considerados N equipamentos de um grupo $L = \{1, 2, \dots, N\}$ sobre os quais se deseja tomar a decisão de manutenção preventiva em um período Q . Supondo que m_i seja o custo necessário para se realizar manutenção no item i , e existe um limite de capital M . Cada item i pertencente ao grupo L sofrerá a tomada de decisão de realizar ou não a manutenção através de uma variável binária X_i , podendo ela assumir 0 (não realizar manutenção) ou 1 (realizar manutenção). Além disso, foram definidas três situações para cada item:

- Situação OK: perfeito funcionamento do item durante o tempo analisado;
- Situação FL: item sofreu falha leve; e
- Situação FG: item sofreu falha grave.

Picanço et al (2015) desenhou a árvore com todas informações anteriormente citadas, que é mostrada na Figura 5.

Figura 5 - Árvore de decisão



Fonte: Adaptado de Picanço et al (2015)

As situações anteriormente citadas (OK, FL e FG) estão visíveis, e é associada a cada uma delas uma probabilidade β (referentes à confiabilidade e probabilidade de falha) e prejuízo p .

Por exemplo, o prejuízo p_{i1} está associado à uma probabilidade β_{i1} , que representa a chance da máquina que não sofreu manutenção preventiva (a variável X_i tem que assumir 0 para entrar nessa ramificação) não apresentar falhas. O termo “prejuízo” foi alterado para “custo esperado”, porém ambos podem expressar a mesma idéia nesse caso.

O modelo utilizado pelo autor é baseado nesta árvore de decisão e é mostrado a seguir.

Modelo de Picanço et al (2015):

$$\text{Minimizar } E|P(x)| \quad (5)$$

$$E|P(x)| = \sum_{i=0}^N (1 - x_i) (\beta_{i1} p_{i1} + \beta_{i2} p_{i2} + \beta_{i3} p_{i3}) + x_i (m_i + \beta_{i4} p_{i4} + \beta_{i5} p_{i5} + \beta_{i6} p_{i6}) \quad (6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^N x_i m_i \leq M \quad (7)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad (8)$$

A função objetivo, Equação (5), minimiza o valor esperado do custo total considerando os custos da manutenção, que é calculado pela Equação (6). Esse cálculo considera as probabilidades e os custos associados aos diferentes tipos de falha que podem ocorrer ao se fazer ou não a manutenção. A resolução é sujeita à restrição de orçamento, segundo a Equação (7).

O autor utiliza softwares como MS-Excel e GLPK para resolver o problema em um tempo viável, e considera diferentes orçamentos para analisar diferentes situações. Sua aplicação foi em um terminal logístico de açúcar em Ribeirão Preto-SP, tendo como vista gerenciar e movimentar recursos de manutenção de forma eficaz.

Picanço et al (2015) deixaram claro que os dados, como as probabilidades e as confiabilidades de equipamentos, requerem um histórico considerável e que nem todas empresas brasileiras têm controle absoluto sobre essas variáveis. Em algumas situações são necessários levantamentos e refinamentos de dados de falhas para conseguir os parâmetros anteriormente citados.

3. DESENVOLVIMENTO

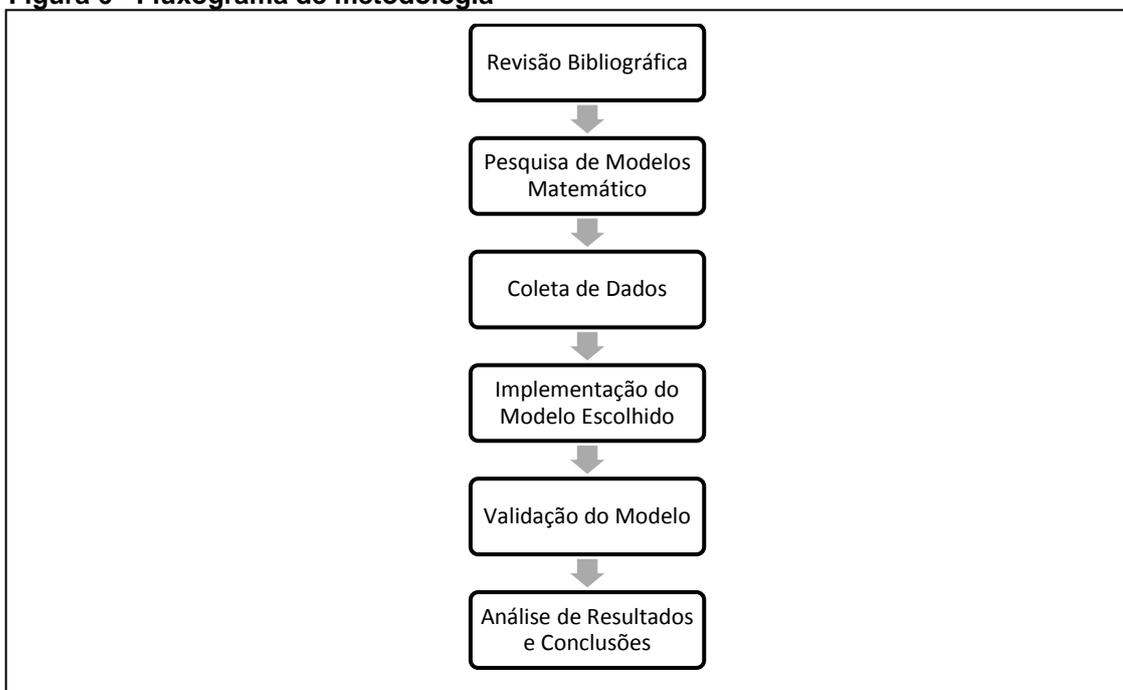
3.1 CLASSIFICAÇÃO E PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

Na presente pesquisa será utilizado um modelo matemático para representar um problema de certo cenário na gestão da manutenção. Segundo Menezes e Silva (2005), é possível classificar uma pesquisa como quantitativa quando é necessário o uso de recursos para averiguar e categorizar informações e opiniões previamente quantificadas. Assim a abordagem dessa pesquisa pode ser considerada quantitativa.

Miguel et al (2012) afirmam que a pesquisa axiomática descritiva é aquela fundamentada em modelos que retratam a maneira que se comporta o problema abordado. Essa definição pode ser usada para caracterizar esta pesquisa, que utilizará como base um modelo matemático já existente na literatura que melhor represente a situação estudada.

Na Figura 6 é apresentado o fluxograma cuja função é ilustrar os passos para realização deste trabalho, que serão explicados posteriormente.

Figura 6 - Fluxograma de metodologia



Fonte: Autor (2016)

A primeira etapa consiste de uma revisão literária de conteúdos previamente publicados como artigos, livros e trabalhos acadêmicos para analisar variações nas

abordagens de problemas de manutenção, ter um melhor entendimento sobre o assunto em geral e optar por uma metodologia adequada para desenvolver essa pesquisa. Além disso, tal revisão permite compreender os principais conceitos abordados por este trabalho na área de Manutenção e de PO.

Utilizando o modelo abordado por Picanço et al (2015) como fundamento, esse estudo procura verificar sua aplicabilidade para a situação analisada em uma empresa do setor de borracha. Assim será possível definir quais parâmetros serão usados e as variáveis envolvidas para realizar a próxima etapa.

Após a obtenção dos dados, o modelo será implementado e em seguida validado para avaliar se o mesmo se comporta de maneira satisfatória. Caso seja necessário o modelo será readaptado e novamente implementado e validado. Por fim, os resultados serão analisados e serão formadas as conclusões sobre o estudo.

3.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa estudada atua no setor de borracha e, por motivos de discrição, optou por não ser identificada no estudo realizado, mas contribuiu com os dados do sistema estudado destinados para fins acadêmicos.

Sua participação no mercado é significativa, considerando que efetuou aquisições de muitas outras organizações ao longo de sua história. Está presente em diversos países, com seu maior potencial concentrado no mercado europeu.

3.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO

O sistema escolhido para o estudo foi uma Linha de Calandragem, composta por 3 máquinas, sendo elas a Calandra, Extrusora e Moinho, que por sua vez foram divididas em 18 subsistemas. Foram apenas considerados 15 desses 18 subsistemas, pois foram os que apresentavam mais de uma quebra no ano de 2016.

A linha de calandragem é alimentada constantemente com matéria-prima (polímeros, borracha, etc.) que passam por dois ou mais cilindros, que por sua vez conformam o material em forma de filme ou lâmina (SILVA; ANZANELLO, 2011). Esse

sistema abastece o restante da linha de produção da indústria tratada, atendendo os requisitos dos pedidos a serem processados.

3.4 UTILIZAÇÃO DO MODELO

Dada uma situação em que existem N subsistemas em uma fábrica, deseja-se saber em quais desses subsistemas deve-se realizar a manutenção preventiva a fim de se minimizar custos consequentes das escolhas de se fazer ou não manutenção preventiva.

A função objetivo é composta pelo vetor binário, pelas matrizes de custo e possibilidade, e pelo vetor de custo de manutenção preventiva. Cada elemento do vetor binário irá indicar a decisão de se fazer a manutenção em um dado subsistema ou não. Considera-se um orçamento limite representado por OL disponível para manutenções preventivas, as quais têm seus custos distintos por subsistema.

Os eventos considerados, cada um com seu custo e probabilidade, são classificados em duas partes e são definidos a seguir:

- Decisão de não realizar manutenção preventiva em um subsistema:
 - Evento 1: o subsistema não sofre falhas;
 - Evento 2: o subsistema sofre FL;
 - Evento 3: o subsistema sofre FG.
- Decisão de realizar manutenção preventiva em um subsistema:
 - Evento 4: o subsistema sofre uma FL;
 - Evento 5: o subsistema sofre uma FG; e
 - Evento 6: o subsistema não sofre falhas;

Este modelo foi baseado no modelo de Picanço et al (2015), porém conta com alguns conceitos diferenciados que serão explicados posteriormente. Foi analisada a possibilidade de considerar uma sequência de períodos de manutenção. Porém, como o problema é tratado de forma estática e as funções de confiabilidade e probabilidade de falha variam com o tempo, foi descartada essa possibilidade.

Em relação ao modelo de Picanço et al (2015), uma das diferenças é a utilização de dados com dois diferentes intervalos de intervenção. A intenção disso é explorar ainda mais o modelo. Abaixo seguem os parâmetros, índices, variáveis e o modelo adaptado:

- Índices:

i Índice de subsistemas ($i = 1, \dots, N$)

- Parâmetros:

OL Orçamento limite para manutenção preventiva

p_i Custo de manutenção preventiva para cada subsistema i

β_{i1} Probabilidade do subsistema i sofrer o evento 1

β_{i2} Probabilidade do subsistema i sofrer o evento 2

β_{i3} Probabilidade do subsistema i sofrer o evento 3

β_{i4} Probabilidade do subsistema i sofrer o evento 4

β_{i5} Probabilidade do subsistema i sofrer o evento 5

β_{i6} Probabilidade do subsistema i sofrer o evento 6

C_{i1} Custo do subsistema i no evento 1

C_{i2} Custo do subsistema i no evento 2

C_{i3} Custo do subsistema i no evento 3

C_{i4} Custo do subsistema i no evento 4

C_{i5} Custo do subsistema i no evento 5

C_{i6} Custo do subsistema i no evento 6

- Variáveis:

X_i Assume 1 se for realizada manutenção preventiva no subsistema i e 0 se não for realizada.

Função objetivo

Minimizar $E|P(x)|$

$$E|P(x)| = \sum_{i=1}^N (1 - x_i)(\beta_{i1}C_{i1} + \beta_{i2}C_{i2} + \beta_{i3}C_{i3}) + x_i(p_i + \beta_{i4}C_{i4} + \beta_{i5}C_{i5} + \beta_{i6}C_{i6}) \quad (9)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^N x_i * p_i \leq OL \quad (10)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad (11)$$

A função objetivo é representada na Equação (1), conforme descrito anteriormente. Na Equação (2) somente existe a premissa de limitação dos gastos com manutenções preventivas. Por fim, a Equação (3) define o conjunto no qual a variável X_i pertence.

Os fatores que diferenciam este modelo de sua referência, modelo de Picanço et al (2015), são os seguintes:

- Na matriz de Custos, o evento 6 não possui custo pelo fato de já estar na função objetivo;
- O tempo da manutenção preventiva foi considerado o mesmo de se realizar uma manutenção corretiva de FL, pois estes eram muito parecidos segundo a empresa;
- Quando ocorre uma FG em um subsistema, o custo levado em conta é somente o de uma manutenção corretiva em uma FG, não se adiciona o custo de uma FL; e
- A chance de acontecer uma FL após a realização de manutenção preventiva é reduzida em 70%.

O último fator diferenciador entre os modelos pode ser explicado pela ausência da mudança da confiabilidade das máquinas após manutenção preventiva segundo os autores Picanço et al (2015). Seguindo o raciocínio utilizado pelos autores em seu artigo, a aplicação da manutenção preventiva não melhora a situação do equipamento, não sendo adequado à realidade. Portanto, utilizou-se neste estudo o fator de 70% de redução de uma chance de falha leve após a realização de manutenção preventiva.

Considerando tal modelo, os parâmetros citados e utilizando os dados fornecidos pela empresa, montou-se as matrizes de parâmetros de custos e probabilidades de eventos. A próxima seção detalha como foram geradas tais matrizes.

Para este estudo de caso, a distribuição que mais se adequa à curva gerada pelos dados de TTF utilizados para obter a curva de confiabilidade e de probabilidade de falha, é a de Weibull. Posteriormente será mostrado o porquê desta escolha, apesar de que sua presença vasta em artigos e trabalhos de manutenção indica que sua utilização é comum no campo de pesquisa de gestão da manutenção.

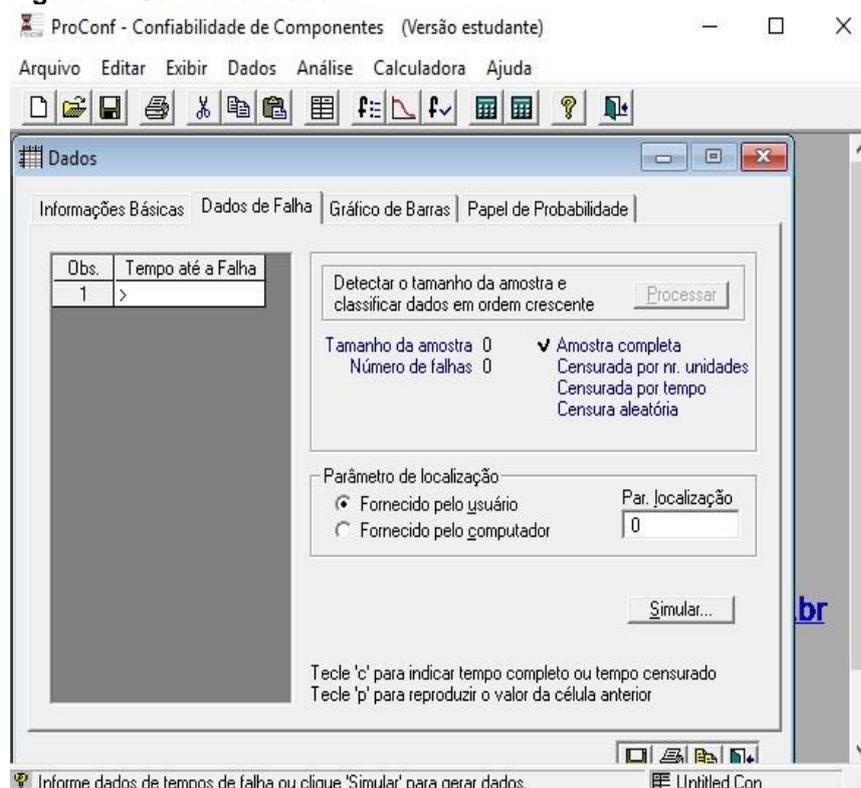
3.5 BASE DE DADOS

Nesta seção serão demonstrados os passos realizados para se partir dos dados obtidos e chegar aos parâmetros utilizados no modelo.

3.5.1 Confiabilidade e Probabilidade de Falha

Primeiramente, para obter a função de confiabilidade dos subsistemas, foram utilizados dados de tempo até falha durante o ano de 2016. Os dados de TTF dos subsistemas foram aplicados no *software* Proconf, de acesso livre, para determinar a curva de confiabilidade em função do tempo. A Figura 7 mostra o visual do *software* Proconf.

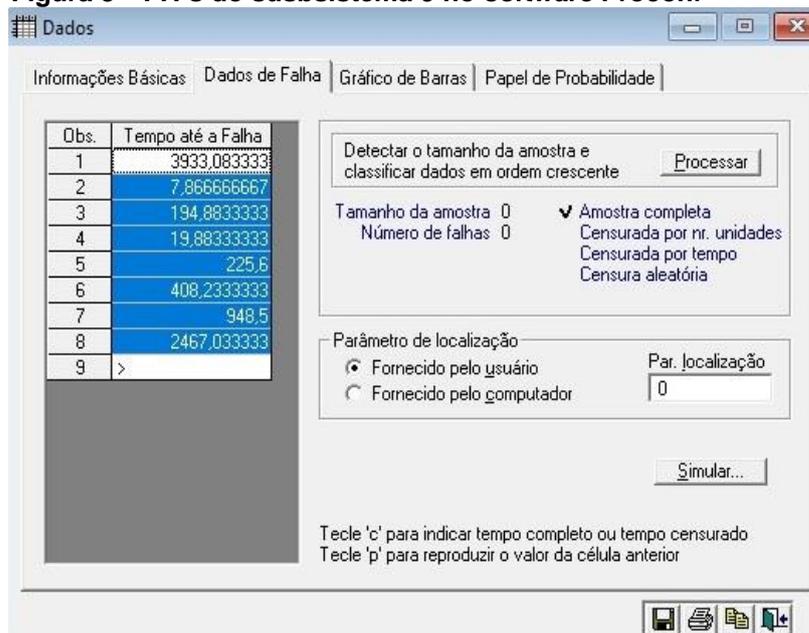
Figura 7 - Software Proconf



Fonte: Autor (2017)

Após determinar a curva de confiabilidade, é necessário estabelecer um período entre intervenções para analisar o comportamento da confiabilidade. A Figura 8 mostra a tela para inserir valores de TTF de um subsistema no software, no caso o subsistema 9. Após clicar em 'Processar' o gráfico é gerado.

Figura 8 - TTFs do subsistema 9 no software Proconf

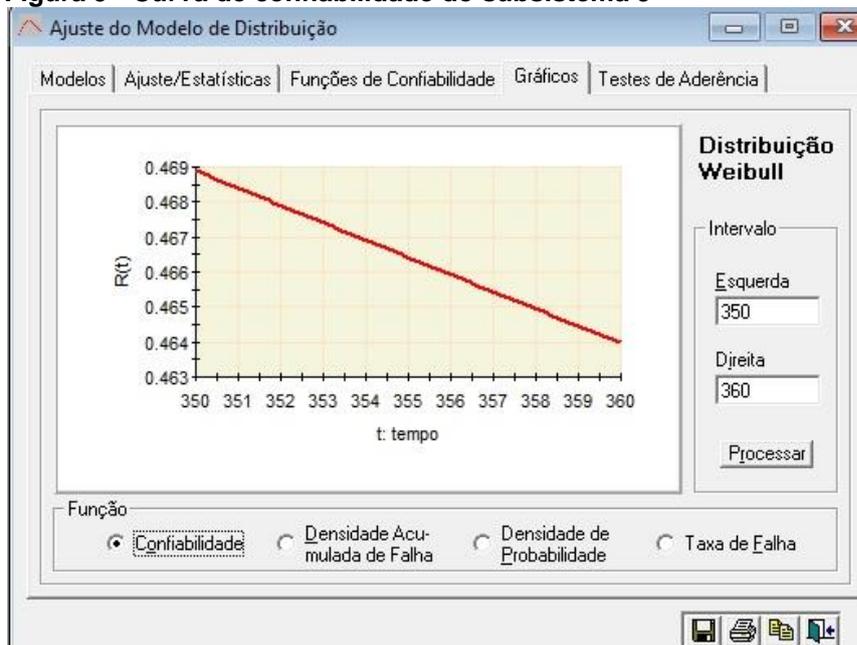


Fonte: Autor (2017)

Para melhor entendimento, o caso da Figura 8 mostra os TTFs na coluna “Tempo até a Falha” do subsistema 9 para cada observação feita (coluna “Obs.”). Por exemplo, desde o início do ano de 2016 até a primeira quebra do subsistema se passaram 3933,083 horas e desta falha até a próxima se passaram 7,86 horas.

Foi adotado o valor quinzenal e mensal de intervalo de intervenção, 360 horas (15 dias, 24 horas/dia) e 720 horas (30 dias, 24 horas/dia) para determinar a confiabilidade dos equipamentos. A Figura 9 mostra um exemplo de gráfico gerado com dados de TTF, fornecendo o valor da confiabilidade para o intervalo de intervenção de falha adotado.

Figura 9 - Curva de confiabilidade do subsistema 9



Fonte: Autor (2017)

Esse procedimento foi repetido para todos os subsistemas que tinham mais de uma falha durante o ano analisado, pois o programa não reproduzia um gráfico com somente um dado de quebra. Este foi o caso de 3 dos 18 subsistemas da linha de calandragem. Para melhor visualização do valor de confiabilidade no gráfico, foram utilizados os intervalos de 350 a 360 horas e de 710 a 720 horas nos espaços “Esquerda” e “Direita” do Proconf.

No caso da Figura 9, o valor de $R(t)$ para $t = 360$ horas é de 0,464, ou seja, 46,4% de confiabilidade. Isso significa que de acordo com os TTF utilizados, tem-se a informação de que o nível de confiabilidade do subsistema 9 cai para 46,4% em um intervalo de tempo de quinze dias.

Com os dados de confiabilidade obtidos, restava subtrair o valor de confiabilidade de cada subsistema de 1 (afinal, são complementares) para obter as probabilidades de falha. Na Tabela 1 estão os valores de confiabilidade dos equipamentos, as probabilidades de falha podem ser calculadas a partir desses.

Tabela 1 - Valores de confiabilidade dos subsistemas (intervalo quinzenal e mensal)

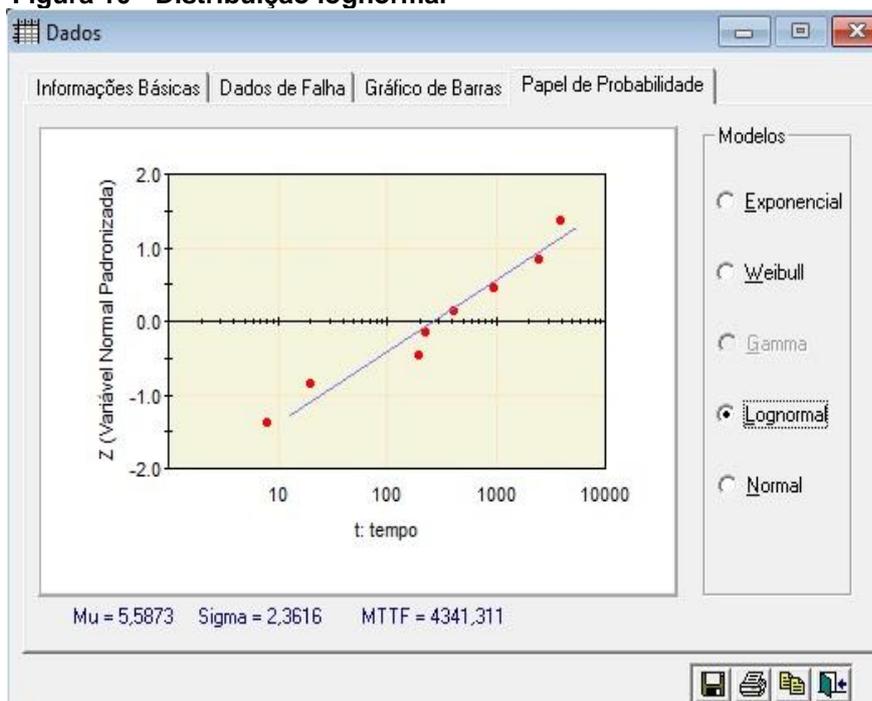
Subsistemas	$R(\hat{j})$ - Quinzenal	$R(\hat{j})$ - Mensal
Subsistema 1	43,20%	21,05%
Subsistema 2	38,00%	29,40%
Subsistema 3	5,65%	0,95%
Subsistema 4	20,20%	4,70%
Subsistema 5	62,80%	47,80%
Subsistema 6	78,50%	61,70%
Subsistema 7	69,18%	48,60%
Subsistema 8	51,60%	33,55%
Subsistema 9	46,40%	34,00%
Subsistema 10	30,00%	21,60%
Subsistema 11	82,50%	67,50%
Subsistema 12	50,00%	31,80%
Subsistema 13	59,20%	38,80%
Subsistema 14	37,73%	19,50%
Subsistema 15	55,90%	43,00%

Fonte: Autor (2017)

Alguns equipamentos apresentaram quedas notáveis comparando o valor de confiabilidade, como os subsistemas 1 e 4. Outros não tiveram uma mudança tão grande em seu valor de confiabilidade, como os subsistemas 6 e 11.

É possível utilizar diferentes distribuições para representar os dados de TTF, porém são notados diferentes comportamentos das retas geradas. A que melhor se encaixa é a de Weibull, segundo as comparações nas figuras a seguir feitas utilizando o subsistema 9, para o período de intervenção quinzenal.

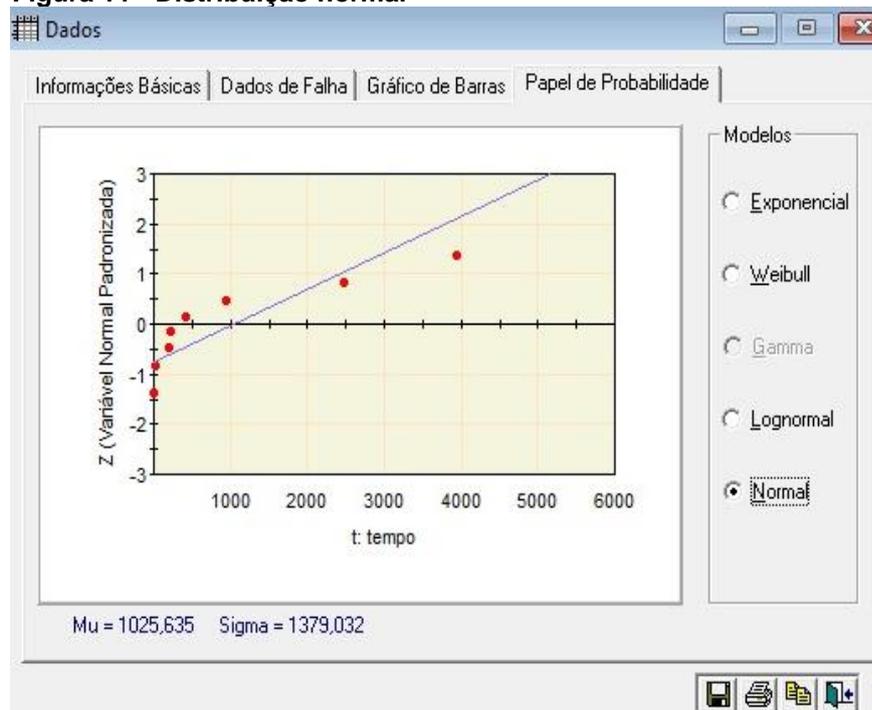
Figura 10 - Distribuição lognormal



Fonte: Autor (2017)

Na Figura 10 é possível notar que os pontos se encontram próximos à reta, o que indica que a distribuição lognormal poderia ser uma escolha para representar os dados de confiabilidade dos subsistemas.

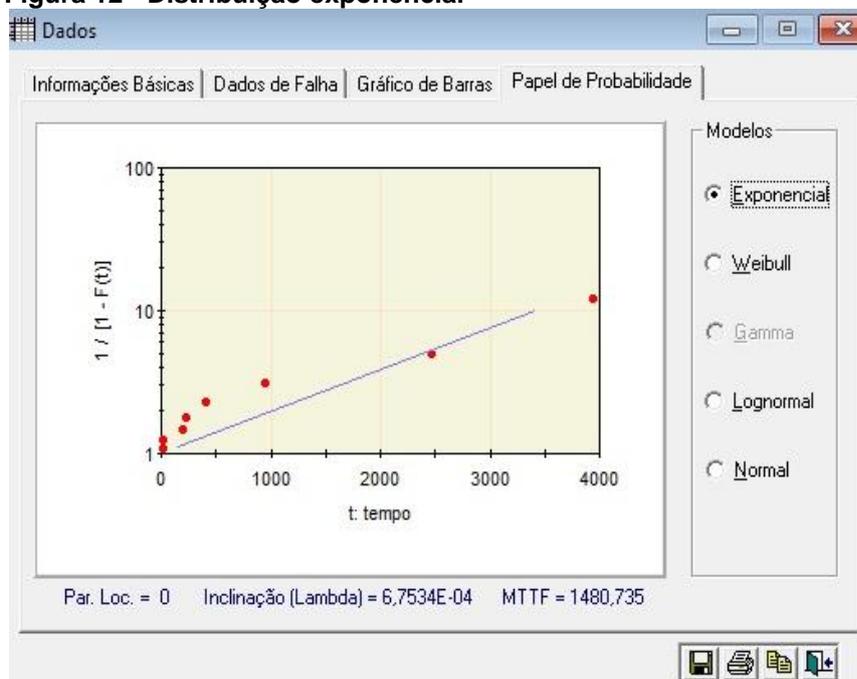
Figura 11 - Distribuição normal



Fonte: Autor (2017)

Na distribuição normal, conforme a Figura 11, os pontos estão aparentemente desorganizados, não sendo esta uma opção viável de escolha de distribuição para representar os dados de confiabilidade dos subsistemas.

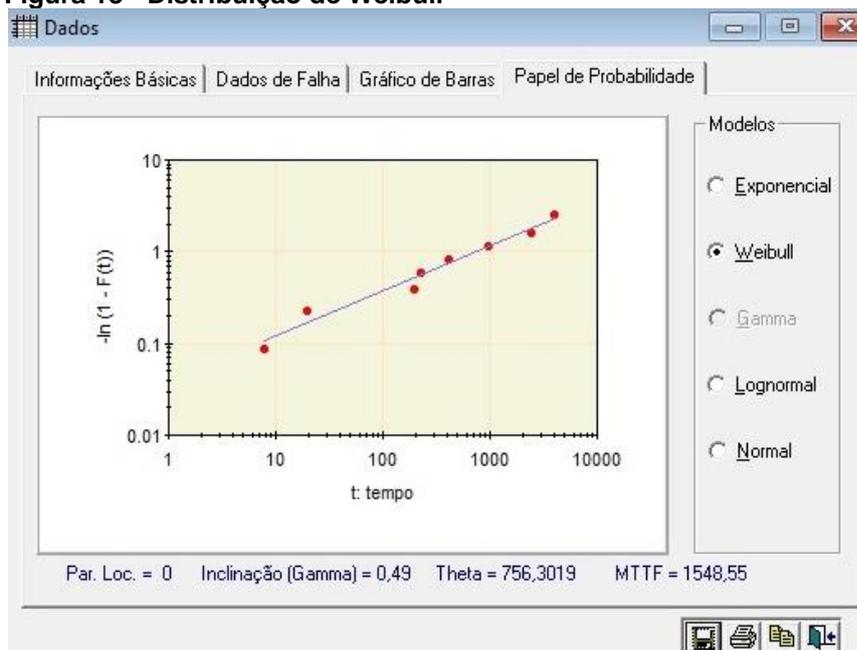
Figura 12 - Distribuição exponencial



Fonte: Autor (2017)

De acordo com o gráfico da Figura 12, a distribuição exponencial também se mostrou ineficiente, de acordo com o posicionamento dos pontos em relação à reta, sendo então descartada como opção para esse estudo.

Figura 13 - Distribuição de Weibull



Fonte: Autor (2017)

Para este estudo de caso, a distribuição que mais se adequa à curva gerada pelos dados de TTF utilizados para obter a curva de confiabilidade e de probabilidade de falha é a de Weibull, representada na Figura 13.

Através dos gráficos gerados pelo Proconf, é possível notar que dentre as demais distribuições, a de Weibull foi a que teve os pontos mais próximos da reta. Além disso, sua presença vasta em artigos e trabalhos de manutenção indica que sua utilização é comum no campo de pesquisa de gestão da manutenção.

3.5.2 Probabilidades de falha leve e falha grave

As probabilidades de FL e FG foram determinadas a partir da avaliação do *downtime*, ou tempo de quebra, de cada subsistema. No artigo base de Picanço et al (2015), não foi especificado como diferenciar uma falha leve de uma falha grave. Desta forma, foi sugerido pelo colaborador da empresa a seguinte condição: caso o valor de *downtime* da quebra de um subsistema fosse inferior a 30 minutos, era considerada a ocorrência de uma FL e acima desse valor uma FG.

Para chegar nas probabilidades de cada tipo de falha simplesmente dividiu-se a quantia da respectiva falha pelo total de falhas. Três subsistemas não apresentaram FG durante o ano analisado, sendo assim somente foram consideradas as probabilidades de FL.

A Tabela 2 apresenta as probabilidades de cada tipo para todos subsistemas considerados.

Tabela 2 - Probabilidades de FL e FG

Subsistemas	Falha Leve	Falha Grave
Subsistema 1	100,00%	0,00%
Subsistema 2	100,00%	0,00%
Subsistema 3	69,70%	30,30%
Subsistema 4	89,19%	10,81%
Subsistema 5	83,33%	16,67%
Subsistema 6	60,00%	40,00%
Subsistema 7	75,00%	25,00%
Subsistema 8	60,00%	40,00%
Subsistema 9	87,50%	12,50%
Subsistema 10	76,92%	23,08%
Subsistema 11	75,00%	25,00%
Subsistema 12	87,50%	12,50%
Subsistema 13	80,00%	20,00%
Subsistema 14	68,42%	31,58%
Subsistema 15	100,00%	0,00%

Fonte: Autor (2017)

3.5.3 Custos de Manutenção

Para que pudessem ser definidos os custos da manutenção preventiva e corretiva em função do tempo, era necessário estabelecer uma média de *downtime* de cada tipo de falha para todos subsistemas. Seguindo o que foi adotado para diferenciar FL de FG, montou-se a Tabela 3 que traz os tempos médios de *downtime* para os 15 subsistemas para ambos tipos de falha, que foi utilizada para determinar os custos-hora de manutenções:

Tabela 3 - Médias de *downtime*

Subsistemas	Falha Leve (min)	Falha Grave (min)
Subsistema 1	13,57	103,33
Subsistema 2	124,00	0,00
Subsistema 3	11,84	226,2
Subsistema 4	9,48	41,00
Subsistema 5	13,00	0,00
Subsistema 6	11,00	106,5
Subsistema 7	19,00	89,00
Subsistema 8	10,50	78,00
Subsistema 9	12,42	50,00
Subsistema 10	7,90	202,00
Subsistema 11	6,67	34,00
Subsistema 12	12,63	45,00
Subsistema 13	17,00	41,50
Subsistema 14	10,30	255,83
Subsistema 15	14,33	0,00

Fonte: Autor (2017)

Além disso, foi necessário considerar o custo-médio com material para manutenções preventivas e corretivas. Alguns subsistemas não apresentaram custos de materiais para ambos intervalos, sejam eles de manutenção corretiva ou preventiva, pela baixa incidência de quebras e pelo insignificante valor de materiais, segundo informações do colaborador da empresa. A Tabela 4 apresenta os custos de materiais para o período quinzenal de intervenções.

Tabela 4 - Custo médio de materiais para manutenções por subsistema (intervalo quinzenal)

Subsistemas	Custo Médio Material Preventiva (R\$)	Custo Médio Material Corretiva (R\$)
Subsistema 1	512,86	961,30
Subsistema 2	-	2.094,82
Subsistema 3	7.286,38	14.498,76
Subsistema 4	261,85	370,55
Subsistema 5	-	-
Subsistema 6	-	-
Subsistema 7	36,00	181,35
Subsistema 8	424,17	1.592,42
Subsistema 9	-	-
Subsistema 10	-	41,57
Subsistema 11	-	-
Subsistema 12	-	367,61
Subsistema 13	236,83	3.177,18
Subsistema 14	190,82	2.786,42
Subsistema 15	-	-

Fonte: Autor (2017)

Nesta tabela, os custos de materiais foram divididos por 2 pois os dados obtidos eram de médias mensais para as respectivas manutenções. Os custos médios mensais estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Custo médio de materiais para manutenções por subsistema (intervalo mensal)

Subsistemas	Custo Médio Material Preventiva (R\$)	Custo Médio Material Corretiva (R\$)
Subsistema 1	1.025,72	1.922,60
Subsistema 2	-	4.189,64

Subsistema 3	14.572,76	28.997,51
Subsistema 4	523,71	741,10
Subsistema 5	-	-
Subsistema 6	-	-
Subsistema 7	72,00	362,69
Subsistema 8	848,33	3.184,84
Subsistema 9	-	-
Subsistema 10	-	83,13
Subsistema 11	-	-
Subsistema 12	-	735,22
Subsistema 13	473,67	6.354,35
Subsistema 14	381,64	5.572,83
Subsistema 15	-	-

Fonte: Autor (2017)

A linha de calandragem é parte de uma linha de produção da fábrica e, caso ela pare, o custo médio da hora parada não programada vale pelo custo da linha produtiva como um todo. Além disso, não foi considerada a contratação de mão-de-obra externa, contando apenas com a da própria indústria.

Foi sugerido um valor pelo colaborador da empresa de R\$ 1.000,00/h para todos subsistemas, que abrange o custo-hora médio da linha parada juntamente com o de mão-de-obra interna, pois com os dados obtidos não era possível determinar o verdadeiro custo-hora da linha de produção parada e o valor da mão-de-obra. Este valor, porém, pode ser alterado conforme a disponibilidade e conhecimento das informações desses custos em um futuro estudo.

Finalmente, para determinar os custos-hora de manutenção preventiva, corretiva leve e corretiva grave por subsistema, foi necessário utilizar as seguintes equações, independente do período de intervenções utilizado como base:

$$CHP = \left(\frac{\text{Downtime Médio FL}}{60} \right) * 1000 + \text{Custo Mat. Preventiva} \quad (9)$$

$$CHCL = \left(\frac{\text{Downtime Médio FL}}{60} \right) * 1000 + \text{Custo Mat. Corretiva} \quad (10)$$

$$CHCG = \left(\frac{\text{Downtime Médio FG}}{60} \right) * 1000 + \text{Custo Mat. Corretiva} \quad (11)$$

A Equação (9), referente ao custo-hora de preventiva (CHP), só conta com o *downtime* de uma FL para a manutenção preventiva, o que se aproxima da realidade da empresa. As Equações (10) e (11) representam os custos-hora das corretivas leves e graves (CHCL e CHCG), respectivamente.

A Tabela 6 contém os valores calculados através das equações anteriormente mencionadas e aplicadas aos dados expostos para período quinzenal.

Tabela 6 - Custos-hora para as respectivas manutenções (intervalo quinzenal)

Subsistemas	Custo-Hora Preventiva (R\$)	Custo-Hora Não Programada (FL) (R\$)	Custo-Hora Não Programada (FG) (R\$)
Subsistema 1	739,03	1.187,47	2.683,47
Subsistema 2	2.066,67	4.161,49	4.161,49
Subsistema 3	7.483,71	14.696,09	18.268,76
Subsistema 4	419,85	528,55	1.053,88
Subsistema 5	216,67	216,67	216,67
Subsistema 6	183,33	183,33	1.775,00
Subsistema 7	352,66	498,01	1.664,68
Subsistema 8	599,17	1.767,42	2.892,42
Subsistema 9	207,00	207,00	833,33
Subsistema 10	131,67	173,23	3.408,23
Subsistema 11	111,17	111,17	566,67
Subsistema 12	210,50	578,11	1.117,61
Subsistema 13	520,17	3.460,51	3.868,84
Subsistema 14	362,49	2.958,08	7.050,25

Subsistema 15	238,83	238,83	238,83
----------------------	--------	--------	--------

Fonte: Autor (2017)

Relembrando, subsistemas com linhas de valores idênticos são os que não apresentaram dados de uma quebra resultante de uma FG. A Tabela 7 possui os valores para os custos-hora utilizados no intervalo mensal de intervenção:

Tabela 7 - Custos-hora para as respectivas manutenções (intervalo mensal)

Subsistemas	Custo-Hora Preventiva (R\$)	Custo-Hora Não Programada (FL) (R\$)	Custo-Hora Não Programada (FG) (R\$)
Subsistema 1	1.251,89	2.148,77	3.644,77
Subsistema 2	2.066,67	6.256,31	6.256,31
Subsistema 3	14.770,09	29.194,84	32.767,51
Subsistema 4	681,71	899,10	1.424,43
Subsistema 5	216,67	216,67	216,67
Subsistema 6	183,33	183,33	1.775,00
Subsistema 7	388,66	679,36	1.846,02
Subsistema 8	1.023,33	3.359,84	4.484,84
Subsistema 9	207,00	207,00	833,33
Subsistema 10	131,67	214,80	3.449,80
Subsistema 11	111,17	111,17	566,67
Subsistema 12	210,50	945,72	1.485,22
Subsistema 13	757,00	6.637,68	7.046,02
Subsistema 14	553,31	5.744,50	9.836,66
Subsistema 15	238,83	238,83	238,83

Fonte: Autor (2017)

Destaca-se que caso o custo-hora da manutenção não-programada de uma FG fosse menor que uma FL, igualava-se os dois ao maior valor, em casos de subsistemas sem quebras de FG durante o ano estudado.

3.5.4 Matriz de Probabilidades

Essa matriz foi definida a partir dos dados de confiabilidade e probabilidades de falha leve e grave. A Tabela 8 contém os 6 eventos e suas probabilidades para cada subsistema i , em um período de intervenção quinzenal para manutenção.

Tabela 8 - Matriz de probabilidades de eventos (intervalo quinzenal)

Subsistemas	Probabilidade dos eventos					
	Evento sem manutenção preventiva			Evento com manutenção preventiva		
	1	2	3	4	5	6
Subsistema 1	43,20%	56,80%	0,00%	17,04%	0,00%	82,96%
Subsistema 2	38,00%	62,00%	0,00%	18,60%	0,00%	81,40%
Subsistema 3	5,65%	65,76%	28,59%	28,31%	0,00%	71,70%
Subsistema 4	20,20%	71,17%	8,63%	23,94%	0,00%	76,06%
Subsistema 5	62,80%	31,00%	6,20%	11,16%	0,00%	88,84%
Subsistema 6	78,50%	12,90%	8,60%	6,45%	0,00%	93,55%
Subsistema 7	69,20%	23,10%	7,70%	9,24%	0,00%	90,76%
Subsistema 8	51,60%	29,04%	19,36%	14,52%	0,00%	85,48%
Subsistema 9	46,40%	46,90%	6,70%	16,08%	0,00%	83,92%
Subsistema 10	30,00%	53,85%	16,15%	21,00%	0,00%	79,00%
Subsistema 11	82,50%	13,13%	4,38%	5,25%	0,00%	94,75%
Subsistema 12	50,00%	43,75%	6,25%	15,00%	0,00%	85,00%
Subsistema 13	59,20%	32,64%	8,16%	12,24%	0,00%	87,76%
Subsistema 14	37,70%	42,63%	19,67%	18,69%	0,00%	81,31%
Subsistema 15	55,90%	44,10%	0,00%	13,23%	0,00%	86,77%

Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 8, a coluna referente ao evento 1 contém os valores da confiabilidade dos subsistemas, visto que é sua confiabilidade que irá representar a chance de não quebrar. Na segunda coluna, a chance de uma FL é constituída da multiplicação da probabilidade de falha F de um subsistema i (Tabela 1) pela chance de uma FL no mesmo subsistema i (Tabela 3). A terceira coluna funciona da mesma

forma que anteriormente explicado, porém considerando a chance de uma falha grave ao invés de uma FL.

Se, por exemplo, o subsistema 10 possui uma probabilidade de falha de 70% em um intervalo de 15 dias após sua última intervenção, e uma chance de 76,92% de acontecer uma falha leve, quer dizer que o subsistema 10 terá uma probabilidade de 53,85% de sofrer o evento 2, que representa a situação onde ocorre uma falha leve sem a realização da manutenção preventiva. Para se chegar a este valor, é necessário multiplicar os dados referentes ao subsistema 10 de probabilidade de falha (ou $1 - R(t)$) pela chance de ocorrência de uma falha leve.

Quando é decidido realizar a manutenção preventiva, temos a coluna do evento 4 contendo a chance de ocorrer uma FL mesmo após a aplicação da preventiva, sendo formulada através do pressuposto de que a chance de ocorrer uma FL é reduzida em 70% do valor de probabilidade de falha da Tabela 1. Isso foi levado em conta para ressaltar que a manutenção preventiva deveria, e de fato faz, diminuir a probabilidade de falhas.

Na coluna do evento 5, a chance de ocorrer uma FG após ser realizada a manutenção preventiva, foi considerada nula assim como no modelo base de Picanço et al (2015). E por fim a coluna do evento 6, no qual o subsistema não apresenta nenhuma quebra após ser feita a manutenção preventiva. Como se trata de uma árvore de decisão, as três possibilidades de cada opção, sem ou com manutenção preventiva, devem somar juntas 100%. Então, o valor para o evento 6 é a subtração da chance de uma FL (evento 4) de 100%.

A Tabela 9 contém as mesmas informações da Tabela 8, porém com os dados voltados para o intervalo de 720 horas (mensal).

Tabela 9 - Matriz de probabilidades de eventos (intervalo mensal)

Subsistemas	Probabilidade dos Eventos					
	Evento sem manutenção preventiva			Evento com manutenção preventiva		
	1	2	3	4	5	6
Subsistema 1	21,05%	65,05%	13,90%	23,69%	0,00%	76,32%
Subsistema 2	29,40%	70,60%	0,00%	21,18%	0,00%	78,82%
Subsistema 3	0,95%	69,03%	30,02%	29,72%	0,00%	70,29%
Subsistema 4	4,70%	85,00%	10,30%	28,59%	0,00%	71,41%
Subsistema 5	47,80%	43,50%	8,70%	15,66%	0,00%	84,34%
Subsistema 6	61,70%	22,98%	15,32%	11,49%	0,00%	88,51%
Subsistema 7	48,60%	38,55%	12,85%	15,42%	0,00%	84,58%
Subsistema 8	33,55%	39,87%	26,58%	19,94%	0,00%	80,07%
Subsistema 9	34,00%	57,75%	8,25%	19,80%	0,00%	80,20%
Subsistema 10	21,60%	60,31%	18,09%	23,52%	0,00%	76,48%
Subsistema 11	67,50%	24,38%	8,13%	9,75%	0,00%	90,25%
Subsistema 12	31,80%	59,68%	8,53%	20,46%	0,00%	79,54%
Subsistema 13	38,80%	48,96%	12,24%	18,36%	0,00%	81,64%
Subsistema 14	19,50%	55,08%	25,42%	24,15%	0,00%	75,85%
Subsistema 15	43,00%	57,00%	0,00%	17,10%	0,00%	82,90%

Fonte: Autor (2017)

3.5.5 Matriz de Custos Esperados

Para determinar os custos que poderiam surgir de cada evento, sendo esses custos esperados representados, por exemplo, pelos custos que poderiam ser absorvidos por uma quebra após manutenção preventiva ou pelo fato de não se realizar manutenção preventiva. Foram utilizadas as Tabelas 10 e 11, respectivamente, para os períodos quinzenal e mensal para os cálculos do modelo.

Tabela 10 - Matriz de custos de eventos (quinzenal)

Subsistemas	Custos dos Eventos (R\$)					
	Evento sem manutenção preventiva			Evento com manutenção preventiva		
	1	2	3	4	5	6
Subsistema 1	0,00	1.187,47	2.683,47	1.187,47	2.683,47	0,00
Subsistema 2	0,00	4.161,49	4.161,49	4.161,49	4.161,49	0,00
Subsistema 3	0,00	14.696,09	18.268,76	14.696,09	18.268,76	0,00
Subsistema 4	0,00	528,55	1.053,88	528,55	1.053,88	0,00
Subsistema 5	0,00	216,67	216,67	216,67	216,67	0,00
Subsistema 6	0,00	183,33	1.775,00	183,33	1.775,00	0,00
Subsistema 7	0,00	498,01	1.664,68	498,01	1.664,68	0,00
Subsistema 8	0,00	1.767,42	2.892,42	1.767,42	2.892,42	0,00
Subsistema 9	0,00	207,00	833,33	207,00	833,33	0,00
Subsistema 10	0,00	173,23	3.408,23	173,23	3.408,23	0,00
Subsistema 11	0,00	111,17	566,67	111,17	566,67	0,00
Subsistema 12	0,00	578,11	1.117,61	578,11	1.117,61	0,00
Subsistema 13	0,00	3.460,51	3.868,84	3.460,51	3.868,84	0,00
Subsistema 14	0,00	2.958,08	7.050,25	2.958,08	7.050,25	0,00
Subsistema 15	0,00	238,83	238,83	238,83	238,83	0,00

Fonte: Autor (2017)

Tabela 11 - Matriz de custos de eventos (intervalo mensal)

Subsistemas	Custos dos Eventos (R\$)					
	Evento sem manutenção preventiva			Evento com manutenção preventiva		
	1	2	3	4	5	6
Subsistema 1	0,00	2.148,77	3.644,77	2.148,77	3.644,77	0,00
Subsistema 2	0,00	6.256,31	6.256,31	6.256,31	6.256,31	0,00
Subsistema 3	0,00	29.194,84	32.767,51	29.194,84	32.767,51	0,00
Subsistema 4	0,00	899,10	1.424,43	899,10	1.424,43	0,00
Subsistema 5	0,00	216,67	216,67	216,67	216,67	0,00
Subsistema 6	0,00	183,33	1.775,00	183,33	1.775,00	0,00
Subsistema 7	0,00	679,36	1.846,02	679,36	1.846,02	0,00
Subsistema 8	0,00	3.359,84	4.484,84	3.359,84	4.484,84	0,00
Subsistema 9	0,00	207,00	833,33	207,00	833,33	0,00
Subsistema 10	0,00	214,80	3.449,80	214,80	3.449,80	0,00
Subsistema 11	0,00	111,17	566,67	111,17	566,67	0,00
Subsistema 12	0,00	945,72	1.485,22	945,72	1.485,22	0,00
Subsistema 13	0,00	6.637,68	7.046,02	6.637,68	7.046,02	0,00
Subsistema 14	0,00	5.744,50	9.836,66	5.744,50	9.836,66	0,00
Subsistema 15	0,00	238,83	238,83	238,83	238,83	0,00

Fonte: Autor (2017)

Para as Tabelas 10 e 11, existe a única diferença no valor de custo médio de material para as manutenções pelo período de intervenção levado em consideração, fora isso os fatores adotados são os mesmos para todos custos.

O custo associado ao evento 1 sempre será zero, pois não foi realizada manutenção e não houve quebras. Para os eventos 2 e 3, nessa ordem, estão os custos referentes à uma quebra resultante de uma FL e FG e a necessidade de aplicar manutenção corretiva adequada nessas possibilidades.

Se for decidido realizar manutenção preventiva, o custo do evento 4 é adotado caso haja uma FL e o evento 5 para uma FG. O evento 6 é a situação onde o subsistema *i* não sofreu uma quebra, então não tem custos de manutenção corretiva. O custo de manutenção preventiva não está presente no lado direito da árvore de decisão (eventos 4, 5 e 6) pois se encontra na função objetivo. Se a manutenção preventiva é de fato feita, seu custo foi considerado por inteiro.

3.6 RESULTADOS E ANÁLISES

Após estabelecer todos parâmetros e implementar o modelo no *software* Lingo, que por sua vez buscava os dados das planilhas do MS Excel, foram obtidos diferentes resultados durante os testes. Os resultados são divididos em dois períodos de intervenção de manutenção, quinzenal e mensal, para analisar o comportamento do modelo.

Para os dois intervalos de intervenção considerados, foram realizados 6 testes com alterações no orçamento limite para verificar as mudanças das escolhas de subsistemas que vão receber manutenção preventiva atribuídas pelo Lingo.

Com a intenção de definir uma faixa de orçamentos nesses 6 testes realizados, foi calculado qual seria o custo de se realizar manutenção preventiva em todos subsistemas. Através deste custo, foram efetuados testes para observar a mudança na solução do problema, tornando possível determinar o valor limite do orçamento para se gastar e obter o menor prejuízo possível.

Não foi informado o valor disponível da empresa para ser utilizado para manutenções preventivas. Portanto os valores foram definidos de acordo com o limite no qual o modelo não mudava mais sua solução com o aumento do orçamento disponível, e a partir do limite superior foram assumidos o limite inferior e os valores entre eles.

A Tabela 12 contém os resultados considerando intervalo quinzenal de intervenção providos pelo modelo no Lingo e exportados para MS Excel, com seus respectivos custos, orçamentos utilizados e limites.

Tabela 12 - Resultados obtidos em diferentes testes (intervalo quinzenal)

Subsistemas	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6
	X_i	X_i	X_i	X_i	X_i	X_i
Subsistemas 1	0	0	1	1	1	1
Subsistemas 2	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 3	1	1	1	1	1	1
Subsistemas 4	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 5	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 6	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 7	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 8	0	0	0	0	1	1
Subsistemas 9	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 10	1	1	1	1	1	1
Subsistemas 11	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 12	0	0	1	1	0	1
Subsistemas 13	0	1	0	1	1	1
Subsistemas 14	1	1	1	1	1	1
Subsistemas 15	0	0	0	0	0	0
Custo Esperado (R\$)	20.774,24	20.286,21	20.260,65	19.827,36	19.635,48	19.609,93
Orçamento Utilizado (R\$)	7.977,87	8.498,04	8.708,54	9.447,56	9.836,23	10.046,73
Orçamento Limite (R\$)	8.000,00	8.500,00	9.000,00	9.500,00	10.000,00	10.500,00

Fonte: Autor (2017)

No teste 1, por exemplo, foi decidido realizar manutenção preventiva nos subsistemas 3, 10 e 14 com um orçamento de R\$ 8.000,00. Após incrementar R\$ 500,00 no orçamento limite no teste 2, é possível observar que o subsistema 13 foi incluído no plano de manutenção preventiva, juntamente com as máquinas escolhidas no teste 1. O Custo Esperado teve uma queda aproximadamente de R\$ 488,00 com um aumento de R\$ 520,17 de orçamento utilizado. Vale ressaltar que o valor do campo Orçamento Utilizado está incluso no Custo Esperado, pois o custo de manutenção preventiva está incluso na função objetivo do modelo adaptado.

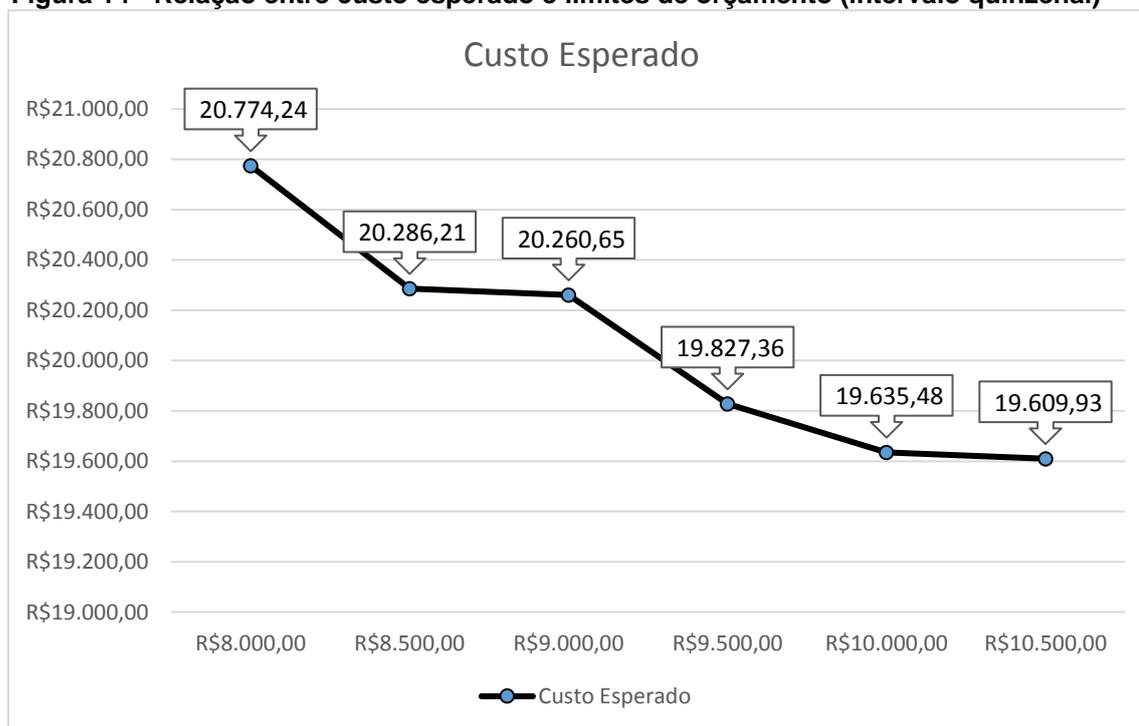
É importante comentar sobre o teste 6, que seria o teste com o limite superior de orçamento disponível para manutenção preventiva. No caso da Tabela 13, após

utilizar quaisquer valores acima de R\$ 10.500,00 eram obtidas respostas iguais a do teste 6. Ou seja, se a empresa tivesse R\$ 20.000,00 ou R\$ 100.000,00 para gastar com manutenção, as mesmas máquinas seriam escolhidas, sendo aquela a solução ótima para o problema. Isso significa que, conforme o modelo, não seria vantajoso investir mais de R\$ 10.500,00 em manutenção preventiva.

Ao subtrair o valor gasto com preventivas (Orçamento Utilizado) do Custo Esperado de cada teste, temos o valor esperado a ser gasto proveniente de manutenções corretivas. No teste 1 da Tabela 12, o valor a ser gasto com manutenção corretiva é de R\$ 12.796,37, e no teste 6, de R\$ 9.563,2. Nesta lógica, evitou-se gastar R\$ 3.233,17 em manutenções corretivas, ao investir R\$ 2.068,86 a mais em manutenções preventivas.

A Figura 14 contém o gráfico mostrando o comportamento do custo esperado em relação ao intervalo de limite de orçamento analisado para cada teste de intervalo quinzenal.

Figura 14 - Relação entre custo esperado e limites de orçamento (intervalo quinzenal)



Fonte: Autor (2017)

Conforme o aumento do Orçamento Disponível, referente à linha horizontal do gráfico da Figura 14, o Custo Esperado teve uma queda de proporção menor.

Sabendo-se que o subsistema 3 possui o menor índice de confiabilidade e, além disso, possui os custos de manutenção mais caros, foi priorizada sua

manutenção preventiva desde o início. O mesmo ocorre com os subsistemas 10 e 14, tendo seus custos de manutenção preventiva relativamente baixos, comparando com as corretivas, e pelos baixos índices de confiabilidade.

Os outros subsistemas que foram escolhidos, sendo eles 1, 8, 12 e 13, foram sendo priorizados conforme o valor disponível de orçamento para gastar com as manutenções foi alterando durante os testes. Os subsistemas 12 e 13 sofrem uma alternância entre os testes 2 e 4, o que pode ser explicado pelos níveis medianos de confiabilidade e custos de preventiva inferiores aos de corretiva. Já o subsistema 1 e o 8 são priorizados a partir de um certo nível orçamentário, pelo mesmo motivo citado anteriormente.

Também é preciso ressaltar os subsistemas que não foram escolhidos em nenhum teste, sendo esses os subsistemas 2, 4, 5, 6, 7, 9, 11 e 15. Isso pode ser justificado pelos seguintes motivos:

- Todos esses subsistemas possuem menos que 9% de probabilidade de FG (evento 3); e
- Os custos esperados após realizar manutenção preventiva nesses subsistemas são superiores aos de se realizar somente manutenção corretiva, deixando a critério da empresa a decisão de quando intervir nos subsistemas.

A diferença nos gastos com manutenções corretivas é maior do que a diferença entre os gastos com manutenções preventivas nos testes. Mesmo que seu valor não seja tão significativo para uma indústria de grande porte, por exemplo, deve ser considerado os custos provenientes das quebras inesperadas, e não somente da manutenção em si. Deve ser feita a mesma consideração para o intervalo mensal.

Para o período de intervenção mensal, os resultados obtidos foram os seguintes, dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados obtidos em diferentes testes (intervalo mensal)

Subsistemas	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6
	X_i	X_i	X_i	X_i	X_i	X_i
Subsistemas 1	0	0	1	0	1	1
Subsistemas 2	0	0	0	1	1	1
Subsistemas 3	1	1	1	1	1	1
Subsistemas 4	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 5	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 6	1	1	1	1	1	1
Subsistemas 7	1	0	0	0	0	1
Subsistemas 8	0	1	1	1	1	1
Subsistemas 9	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 10	1	1	1	1	1	1
Subsistemas 11	0	0	0	0	0	0
Subsistemas 12	1	1	1	1	1	1
Subsistemas 13	1	1	1	1	1	1
Subsistemas 14	1	1	1	1	1	1
Subsistemas 15	0	0	0	0	0	0
Custo Esperado (R\$)	38.920,17	38.087,33	37.900,66	37.062,13	36.918,64	36.912,95
Orçamento Utilizado (R\$)	16.994,57	17.629,23	18.872,12	19.695,90	20.947,79	21.336,45
Orçamento Limite (R\$)	17.000,00	18.000,00	19.000,00	20.000,00	21.000,00	22.000,00

Fonte: Autor (2017)

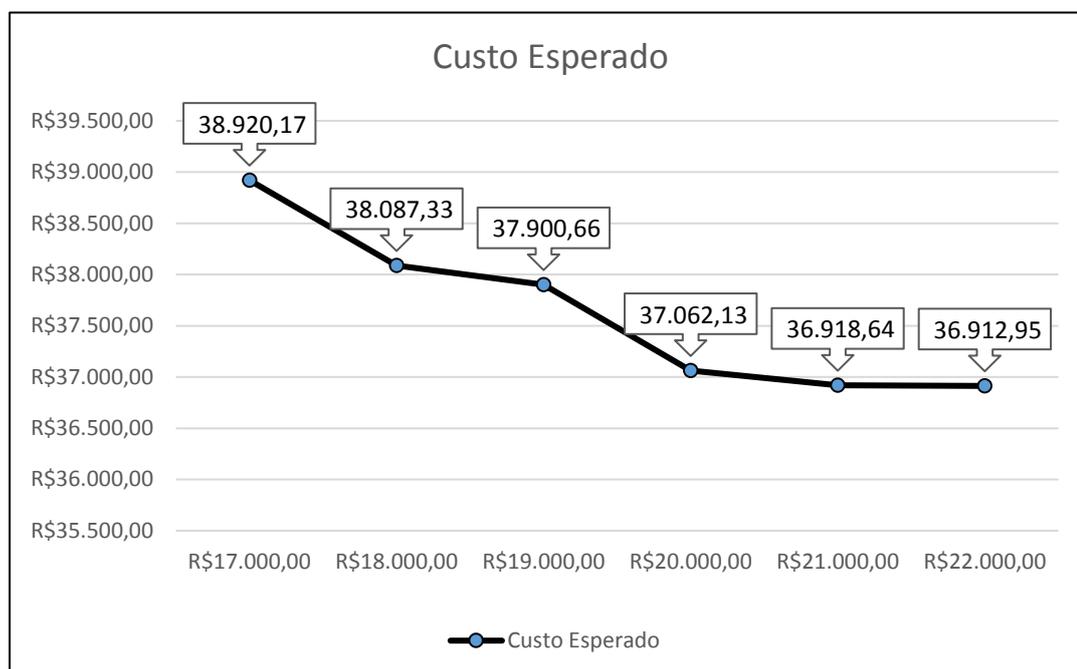
Comparando aos resultados obtidos para o intervalo quinzenal, existem equipamentos escolhidos em comum. Além deles, foram priorizados no último teste os subsistemas 2, 6 e 7, sendo o 2 e 7 os subsistemas que tiveram variações em suas escolhas, e o subsistema 6 que foi priorizado desde o primeiro momento, juntamente com os subsistemas 3, 10, 12, 13 e 14.

Seguindo o mesmo raciocínio ao analisar os resultados de Custo Esperado e Orçamento Utilizado da Tabela 12, o teste 1 da Tabela 13 possui o valor gasto com manutenção corretiva de R\$ 21.925,60, e no teste 6, de R\$ 15.576,50. Desta forma, foi possível economizar R\$ 6.349,10 em manutenções corretivas, gastando R\$ 4.341,88 a mais em manutenções preventivas.

Novamente, como no intervalo quinzenal, se considerarmos somente os gastos previstos para manutenções corretivas (Orçamento Utilizado subtraído do Custo Esperado), temos uma diferença maior do que os gastos com manutenções preventivas. Ou seja, mostra-se viável investir em manutenção preventiva, a fim de reduzir os gastos com paradas inesperadas.

A Figura 15 mostra o gráfico representando a variação do custo esperado com o OL, para os testes realizados no intervalo mensal de intervenção.

Figura 15 – Variação do Custo Esperado (intervalo mensal)



Fonte: Autor (2017)

Existe um comportamento semelhante entre os gráficos das Figuras 14 e 15, o que pode justificar a semelhança das porcentagens das reduções de custos esperados. Em ambos os intervalos de intervenção estudados foram priorizadas as máquinas com os menores índices de confiabilidade. Mesmo não sendo o único motivo para priorização da manutenção preventiva (devem também ser considerados os custos esperados de possíveis quebras, perdas de clientes, etc.), é preciso reconhecer a importância da confiabilidade das máquinas e seus impactos em uma indústria.

De acordo com os resultados obtidos para ambos intervalos, pode-se dizer que o modelo apresenta comportamento adequado à situação estudada. O valor reduzido de gastos com manutenção corretiva é superior ao aumento de gastos com

manutenção preventiva. A prática da manutenção preventiva pode ser considerada vantajosa também por fatores como relacionamento com clientes, prazos de entrega, *recall*, entre outros.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho tinha como objetivo usar um modelo matemático existente na literatura para aplicá-lo em um caso real e verificar os resultados obtidos, na tentativa de minimizar o custo por manutenções preventivas e possíveis quebras inesperadas.

O modelo base foi o de Picanço et al (2015), o que envolve restrições orçamentárias e custos esperados, consequentes de quebras de máquinas e realização de manutenções. O modelo considera fatores como confiabilidade, probabilidade de falha, orçamento limite e segregação de tipos de falhas, que ficam mais próximos de uma realidade de qualquer indústria.

O modelo busca prover a solução onde o custo esperado será o menor possível, conforme o orçamento disponível, e tudo isso levando em conta os eventos e os prejuízos a estes associados. A diferença de resultados entre os intervalos de intervenção de manutenção é pequena, mas aumentando a escala é possível obter uma redução de gastos considerável.

Com a aplicação do modelo foi possível verificar que existe um limite de orçamento ótimo, a partir do qual os gastos com manutenção preventiva não são compensados por reduções nos gastos com manutenção corretiva. Assim, pode-se afirmar que os objetivos da pesquisa foram atendidos, e que o modelo encontrou uma solução ótima para essa situação analisada, em ambos intervalos.

Em relação à redução de custos, deve-se considerar a situação onde uma manutenção corretiva pode ser mais barata em relação à execução da manutenção preventiva, por simples questões de material usado e de dificuldade de execução. Porém, este fato é relativo quando se considera variáveis como prazo de entrega, multas contratuais e mão-de-obra ociosa. Uma parada não planejada pode vir a causar enormes prejuízos para uma empresa, causando, por exemplo, um atraso na produção.

A indisponibilidade de máquinas pode ser mais frequente em um ambiente onde não existe o planejamento da manutenção ou a eficiência deste. A determinação de quando realizar manutenção pode se tornar vital quando envolve os relacionamentos com clientes. Os custos consequentes de uma relação mal administrada, seja por um atraso de entrega ou multa contratual, são possivelmente imensuráveis para uma empresa.

Foi possível obter um avanço considerável nas técnicas de pesquisa científica, de análise crítica e também melhorar a consolidação da experiência acadêmica com a execução deste trabalho. Além disso foi possível entender de melhor forma os desafios que as empresas têm para manter seu maquinário produzindo através de um exemplo real. Priorizações são inevitáveis e devem ser analisadas com cautela para que a melhor decisão seja tomada.

O modelo empregado, contudo, tem limitações. Em trabalhos futuros o problema de manutenção deve ser tratado de forma contínua ao invés de estática. Um equipamento que sofreu manutenção preventiva em um certo momento, terá seu valor de confiabilidade alterado mesmo depois de poucos minutos após a manutenção preventiva, por exemplo. Nesse caso seria possível, ainda, utilizar ferramentas de simulação, a fim de se aproximar mais da realidade.

REFERÊNCIAS

ALARDHI, M., LABIB, A.W. ***Preventive maintenance scheduling of multi-cogeneration plants using integer programming.*** Journal of the Operational Research Society, v. 59, p. 503-509, UK, 2007.

CABRAL, José Paulo Saraiva. **Organização e Gestão Da Manutenção.** Porto – PT: Lidel – Edições Técnicas, Lda., 2006.

CORMEN, T.; LEISERSON, C.; RIVEST, R.; STEIN, C. **Algoritmos: teoria e prática.** 2ª ed. Elsevier, 2002.

DAS, K., LASHKARI, R. S., SENGUPTA, S. ***Machine reliability and preventive maintenance planning for cellular manufacturing system.*** European Journal of Operations Research, v. 183, p. 162-180, 2007.

DEKKER, Rommert. ***Applications of maintenance optimization models: a review and analysis.*** *Reliability Engineering and Systems*; p. 229 – 240, Elsevier, 1996.

European Standard EN 13306 – Maintenance Terminology. April 2001, CEN, Brussels.

FOGLIATTO, Flávio. RIBEIRO, José L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial.** Rio de Janeiro, Elsevier, 2009.

GOLDBARG, Marco C., LUNA, Henrique P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear.** Rio de Janeiro; Elsevier 2ª ed, 2005.

GRIGORIEV, A., KLUNDERT, J. V., SPIEKSMAN, F. C.R., ***Modeling and solving the periodic maintenance problem.*** European Journal of Operations Research, v. 183, p. 162-180, 2007.

HILLIER, Frederick S., LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à Pesquisa Operacional.** São Paulo/SP, McGraw Hill, 2006.

KAY, E. ***The effectiveness of preventive maintenance***. International Journal of Production Research, 14, 329–344, UK, 1976.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras 2001.

MANZINI, R., ACCORSI, R., CENNERAZZO, T., FERRARI, E., MARANESI, F. ***The scheduling of maintenance. A resource-constraints mixed integer linear programming model***. Computers & Industrial Engineering, 87, 561-569, 2015.

MENEZES, Estera M., SILVA, Edna L., **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. UFSC, Florianópolis, 2005.

MIGUEL, Paulo A. C., *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2012.

MONCHY, François. **A Função Manutenção – Formação para a Gerência da Manutenção Industrial**. São Paulo/SP. Editora DURBAN Ltda., 1989.

PICANÇO, Ailson R. S., PELEGRINA, G. D., TOREZZAN, C., SILVA, A.L. da. **Um modelo de programação linear inteira para a tomada de decisão de manutenção preventiva**. XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Pernambuco/PE, 2015.

PINTO, Alan K., XAVIER, Júlio A. N. **Manutenção: Função Estratégica**. Rio de Janeiro, Qualitymark 2ª Ed., 2001.

PINTO, Alan K., XAVIER, Júlio A. N. **Manutenção: Função Estratégica**. Rio de Janeiro, Qualitymark 3ª Ed., 2009.

QUINLAN, J. R. ***Induction of Decision Trees***. Machine Learning, 1, 81-106, 1986.

RAGSDALE, Cliff T., **Modelagem e análise de decisão**. São Paulo/SP, Cengage Learning, 2009.

SACHDEVA, A., et al. ***Planning and optimizing the maintenance of paper production systems in a paper plant.*** Computers & Industrial Engineering, v. 55, p. 817-829, Elsevier, 2008.

SILVA, Ermes M. da, et al. **Pesquisa Operacional: programação linear.** São Paulo/SP, Atlas 3ª ed., 1998.

SILVA, Alice C., ANZANELLO, Michel J. **Análise de confiabilidade para a redução do índice de refugo em um processo de calandragem.** UFRGS, 2011.

TAHA, Hamdy A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral.** São Paulo/SP, Pearson Prentice Hall, 2008.

VALE, José Luciano Viana. **Análise de decisão: uma abordagem comparativa entre modelagem por árvore de decisão e teoria de precificação de opções aplicada a "opções reais".** São Paulo: EAESP/FGV, 1999, 87p.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM - Planejamento e controle da manutenção.** Rio de Janeiro: Qualitymark. Ed., 2002.

XENOS, Harilaus G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva.** Belo Horizonte/MG Editora de Desenvolvimento Derencia, 1998.

WAGNER, H.M., GIGLIO, R.J, GLASER, R.G. ***Preventive maintenance scheduling by mathematical programming.*** Management Science, v. 10, p. 316–334, USA, 1964.

WINSTON, W.L. ***Operations Research: applications and algorithms.*** Brooks/Cole, Belmont, 2004.