



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Departamento de Engenharia de Produção / Escola de Engenharia

Otimização da Manutenção Preventiva em Linhas de Montagem: Estudo de Caso em uma Empresa de Manufatura Contratada do Setor Eletroeletrônico

Andressa Amaral de Azevedo

Fevereiro de 2007

Andressa Amaral de Azevedo

Otimização da Manutenção Preventiva em Linhas
de Montagem: Estudo de Caso em uma Empresa de
Manufatura Contratada do Setor Eletroeletrônico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas
Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Produção.

Linha de Pesquisa: Engenharia Logística e de Manufatura
Orientador: Prof. Samuel Vieira Conceição, PhD

Belo Horizonte - MG

Fevereiro de 2007

Conteúdo

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Importância do Trabalho	3
1.3 Escopo do Trabalho	4
1.4 Estrutura do Trabalho	5
2 Referencial Teórico	6
2.1 Manufatura Contratada	6
2.2 Manutenção Industrial	8
2.2.1 Evolução da manutenção	9
2.2.1.1 Manutenção preventiva	11
2.2.1.2 Estoque de peças de reposição	11
2.2.1.3 Sistema de ordens de serviço	12
2.2.1.4 Sistemas computadorizados de manutenção	12
2.2.1.5 Treinamento	13
2.2.1.6 Envolvimento operacional	13

2.2.1.7	Manutenção preditiva	14
2.2.1.8	Manutenção centrada em confiabilidade	14
2.2.1.9	Manutenção produtiva total	16
2.2.1.10	Melhoria contínua	17
2.2.2	Políticas de manutenção	17
2.2.3	Planejamento e programação	21
2.3	Otimização de Processos	22
2.3.1	Modelos de manutenção preventiva	23
2.3.1.1	Qualidade no sistema produção-manutenção	23
2.3.1.2	Alocação de mão-de-obra para MP	25
3	Ambiente de Pesquisa	29
3.1	Cenário	29
3.2	A Empresa	30
3.3	Tecnologia de Fabricação	31
3.4	Descrição do Processo Produtivo	33
3.5	Descrição da Manutenção Preventiva na Empresa	36
3.5.1	Projetos de manutenção	38
3.5.2	Planos de manutenção	38
3.5.3	Padrões de manutenção	40
3.5.4	Equipe de manutenção	41
3.5.5	Realização das tarefas	44
4	Metodologia de Pesquisa	46
4.1	Metodologia Estudo de Caso	46
4.2	Protocolo de Pesquisa	48

5	Descrição Conceitual do Problema	50
5.1	O Problema	50
5.2	Evolução do Modelo	51
5.3	Modelo Proposto	54
5.4	Testes Computacionais	59
5.4.1	Análise dos resultados	59
5.4.1.1	Grupo 1	60
5.4.1.2	Grupo 2	62
5.4.1.3	Grupo 3	63
6	Apresentação e Análise dos Resultados	64
6.1	Melhorias no Sistema de Manutenção	64
6.1.1	Auditoria	65
6.1.2	Sistema de Informação	66
6.2	Apresentação dos Dados	67
6.2.1	Considerações iniciais	67
6.2.2	Custo de realização da manutenção preventiva	68
6.2.3	Custo de atraso	69
6.2.4	Custo de antecipação	70
6.2.5	Capacidade da força de trabalho	71
6.2.6	Custo de folga e excesso	71
6.2.7	Tempo de execução dos projetos de manutenção	72
6.2.8	Custo de contratar e demitir	73
6.2.9	Matriz de sinergia	73
6.2.10	Custo de sinergia	74

6.2.11	Taxa de utilização da mão-de-obra	75
6.2.12	Demanda da manutenção	75
6.3	Análise dos Resultados	76
6.3.1	Custo da manutenção preventiva na BETA	79
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	83
7.1	Conclusões	83
7.2	Trabalhos Futuros	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	APÊNDICE	92
A	Modelo de Manutenção	92
B	Dados do Modelo	98
B.1	Tempo de execução do projeto de manutenção	98
B.2	Programação da produção e Receita esperada	100

Lista de Figuras

3.1	Faturamento do Setor Eletroeletrônico	30
3.2	Placa de Circuito Impresso	32
3.3	Linha de Produção PTH	33
3.4	Montagem de Placas de Circuito Impresso	34
3.5	Fluxograma do Processo de Produção de PCB	37
3.6	O Plano de Manutenção como do Gerenciamento da Manutenção	39
3.7	Plano de Manutenção Preventiva da Inersora Automática GSM	40
3.8	Padrão de Manutenção Preventiva da Inersora Automática GSM	42
5.1	Representação do Modelo Proposto	53
6.1	Procedimento para Inspeção da Manutenção Preventiva	65
6.2	Procedimento para Validação da Manutenção Preventiva	66

Lista de Tabelas

2.1	Atividades das Empresas OEM e EMS	7
2.2	Evolução da Manutenção	10
2.3	Transição das Atividades de Manutenção entre Departamentos	15
2.4	Características da Melhoria Contínua	17
3.1	Projetos de Manutenção Preventiva da Empresa	38
3.2	Produtividade Geral do SMT	44
4.1	Situações Relevantes para Diferentes Estratégias de Pesquisa	47
5.1	Resultados das Instâncias do Grupo 1	60
5.2	Resultados das Instâncias do Grupo 2	63
6.1	Conjuntos do Modelo	68
6.2	Intervalo de tempo de cada projeto de manutenção	68
6.3	Unidades dos Dados do Modelo	68
6.4	Custo da Manutenção (custo em R\$)	69
6.5	Custo de Atraso da Manutenção (custo em R\$)	69
6.6	Custo Antecipação (custo em R\$)	70
6.7	Capacidade de Mão-de-obra Instalada no Sistema (<i>HH</i>)	71

6.8	Custo de Folga e Excesso de Mão-de-obra (custo em R\$)	72
6.9	Duração de cada Projeto (tempo em h)	72
6.10	Custo de Contratar e Demitir (custo em R\$)	73
6.11	Matriz de Sinergia/Anti-sinergia entre Projetos	74
6.12	Custo de Sinergia/Anti-sinergia entre Projetos (custo em R\$)	74
6.13	Taxa de Utilização da Mão-de-obra	75
6.14	Demanda da Manutenção	76
6.15	Resultados do Grupo 3 - (Alocação \leq Demanda)	77
6.16	Resultados do Grupo 3 - (Alocação = Demanda)	78
6.17	Datas de Realização da Manutenção Preventiva na BETA	80
6.18	Resultados da Manutenção Preventiva na BETA	81
6.19	Custo de Manutenção da BETA	81
6.20	Resultado do Estudo de Caso	82

Abreviaturas

CM	<i>Contract Manufacturer;</i> Manufatura Contratada.
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management Systems;</i> Sistemas Computadorizados de Gerenciamento da Manutenção.
EMS	<i>Electronic Manufacturing Service;</i> Serviço de Manufatura Eletrônica.
HMLV	<i>High-Mix, Low-Volume;</i> Grande-Variedade, Baixo-Volume.
ICT	<i>In Circuit Test;</i> Teste de Circuito.
OEM	<i>Original Equipment Manufacturers;</i> Fabricantes de Equipamentos Originais.
PCB	<i>Printed Circuit Board;</i> Placa de Circuito Impresso.
PTH	<i>Pin Through Hole;</i> Montagem Manual.

RCM	<i>Reliability Centered Maintenance;</i> Manutenção Centrada em Confiabilidade.
SMD	<i>Surface Mount Device;</i> Dispositivo de Montagem em Superfície.
SMT	<i>Surface Mount Technology;</i> Tecnologia de Montagem em Superfície.
TPM	<i>Total Productive Maintenance;</i> Manutenção Produtiva Total.
TQM	<i>Total Quality Management;</i> Gestão da Qualidade Total.
CQ	Controle de Qualidade.
MC	Manutenção Corretiva.
MP	Manutenção Preventiva.
MPd	Manutenção Preditiva.
OP	Ordem de Produção.
OS	Ordem de Serviço.
PO	Pesquisa Operacional.
RM	Reparo Mínimo.

Resumo

A participação do Brasil no moderno processo tecnológico, disseminado através da globalização, tem colocado as organizações empresariais em ritmo acelerado de mudanças, proporcionando um mercado altamente competitivo. Em mercados dinâmicos, como o do setor eletroeletrônico, caracterizado pelo cenário de alta volatilidade da demanda, curto ciclo de vida dos produtos e forte tendência à fabricação de grandes variedades de produtos em pequenos volumes de produção (*High-Mix, Low-Volume*), as exigências por flexibilidade do processo produtivo e baixos custos são ainda maiores.

Diante deste cenário, as empresas do setor encontram grande dificuldade em determinar um plano ótimo de operações onde as intervenções para manutenção preventiva nas linhas de produção sejam, do ponto de vista econômico, previstas para o momento realmente mais adequado. Neste trabalho é desenvolvido um modelo de programação matemática para apoio às decisões relacionadas à programação da manutenção preventiva em linhas de produção. Posteriormente, utilizando-se o estudo de caso de uma EMS (*Electronic Manufacturing Service*), a metodologia desenvolvida é testada e a consistência dos resultados obtidos é verificada através da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo.

Palavras Chaves: Modelo de Otimização, Manutenção Industrial, Manufatura Contratada.

Abstract

Brazilian participation in the modern technological process, spread out through globalization, has increasingly demanded changes from companies in order to provide competitiveness. In a dynamic market, like the sector of electronics, characterized by a scenario of a high volatile demand, short product's life cycle and strong tendency to fabricate great varieties of products in small volumes (High Mix - Low Volume), the requirements for flexibility of the productive process and low costs are still bigger.

It is difficult to define an optimal long term of operations plan which includes preventive maintenance intervention in lines of production. In this dissertation a support model of mathematical programming for the definition of a preventive maintenance schedules in lines of production is developed. The methodology and algorithm were tested on an EMS (Electronic Manufacturing Service) case and the consistency of the solutions obtained was verified through sensitivity analysis parameter of model.

Capítulo 1

Introdução

No atual nível de competição, a utilização eficiente de todos os recursos de produção, como máquinas, mão-de-obra e matéria-prima tem sido uma exigência constante para a sobrevivência das empresas (KODALI e CHANDRA [20]). Além disso, o crescimento da automação industrial, de acordo com Dekker [9], forçou os gestores a prestarem mais atenção na manutenção do complexo de equipamentos, avaliando o impacto do sistema de manutenção no processo produtivo e, conseqüentemente, a disponibilidade dos equipamentos.

Segundo Hipkin e Cock [16], indústrias de manufatura têm sido observadas em suas funções de manutenção pelas seguintes razões:

- o aumento da competitividade tem demandado um estreito controle dos custos, com o gerenciamento da mesma conta do setor de manutenção para uma quantidade cada vez maior de operações;
- as estruturas automatizadas requerem maior confiabilidade e disponibilidade tanto da planta quanto dos equipamentos;
- a segurança do sistema de produção está cada vez mais vinculada às falhas nos equipamentos.

Porém, mesmo com o crescimento de estudos voltados para o aumento da confiabilidade de máquinas e equipamentos em geral, é praticamente incontestável a

necessidade de paradas periódicas para fins de inspeções, revisões e reparos nos equipamentos.

Considerando o setor eletroeletrônico, em que os fabricantes estão inseridos em um ambiente dinâmico e, segundo Cyr *et al.*[8], com alta volatilidade da demanda e mercado evolucionário, planejar o momento mais propício para a intervenção da manutenção preventiva se torna uma tarefa de grande complexidade.

Uma estratégia interessante utilizada pelas empresas detentoras das marcas, OEM (*Original Equipment Manufacturers*), deste setor é a contratação de empresas prestadoras de serviços de manufatura, denominadas EMS (*Electronic Manufacturing Services*). Segundo Hunt e Jones [17], as OEM encontraram na terceirização dos serviços de manufatura uma forma de ampliar seus mercados, focalizando seu trabalho no *marketing* e desenvolvimento de produtos.

O presente trabalho, diante deste contexto, procura entender e solucionar, a partir de um estudo de caso, o problema da alocação das atividades de manutenção preventiva em linhas de produção de uma empresa de manufatura contratada do setor eletroeletrônico. Para resolver este problema, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira que apresenta como resultado um plano otimizado de paradas de produção para a realização das atividades de manutenção preventiva buscando equilibrar os custos de produção e manutenção da empresa.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é disponibilizar uma ferramenta para apoiar a elaboração de cronograma de paradas para manutenção preventiva em linhas de produção SMT (*Surface Mount Technology*), com foco na otimização dos recursos necessários e equilíbrio dos custos de produção e manutenção. E, como objetivos específicos, têm-se:

- (i) Fazer um levantamento bibliográfico sobre o tema deste trabalho, bem como as diversas metodologias utilizadas para o problema em questão;

- (ii) Desenvolver um ou mais modelos de programação linear inteira para o problema de programação da manutenção preventiva em uma indústria de manufatura contratada do setor eletro-eletrônico;
- (iii) Implementar o modelo em um programa de otimização linear;
- (iv) Testar e Validar o modelo, avaliando as particularidades na indústria eletrônica do segmento de EMS;

Por outro lado, uma vez que o processo de planejamento se torna mais direto e transparente no longo prazo, outros objetivos estratégicos poderão ser alcançados.

O principal deles está relacionado com a problemática da distribuição de capacidade de produção ao longo do tempo. Um planejamento consistente tende a criar condições favoráveis à ordenação e coerência das ações gerenciais nos planos operacional, tático e estratégico. A adequação na programação de produção propicia o aumento do nível de atendimento às demandas do mercado e conseqüentemente, das receitas da empresa.

1.2 Importância do Trabalho

O tema proposto pode ser justificado por deficiências no gerenciamento de processos e da manutenção de equipamentos que resultam em perdas e redução no desempenho dos equipamentos industriais (LJUNGBERG [23]). A maior parte das empresas de manufatura necessitam tomar decisões relativas ao chão de fábrica, mais precisamente, determinar a programação da produção, e conseqüentemente, conciliá-las com as atividades de manutenção dos equipamentos. Determinar a melhor programação implica em uma considerável economia de tempo a qualquer empresa e conseqüentemente em uma sensível redução de seus custos.

Como cada empresa possui um cenário diferente, a utilização de sistemas genéricos, nem sempre compatíveis com a realidade da empresa, se torna impraticável. Algumas empresas chegam a utilizar planilhas eletrônicas como suporte para determinar a programação das operações de manutenção. Então, o desenvolvimento de

sistemas específicos, voltados para a realidade da empresa e utilizando técnicas adequadas, se torna útil para determinar a melhor programação da manutenção.

Além disso, o desenvolvimento deste trabalho contribuirá para a divulgação de técnicas de otimização nas empresas, reduzindo os custos com alocação de recursos de forma a satisfazer as necessidades dos clientes e valorizar o papel do engenheiro de produção nas atividades empresariais.

1.3 Escopo do Trabalho

Este trabalho não pretende propor políticas de manutenção conforme tradicionalmente esta expressão é tratada pelos especialistas desta área. Parte-se do princípio que o tipo de fábrica em estudo é composta de linhas de montagem SMT que devem sofrer paradas gerais de manutenção de tempos em tempos, por diversos motivos, conforme será detalhado dentro deste trabalho.

Desta forma, não se pretende ampliar o foco do trabalho através da abordagem de áreas de pesquisa específicas como, por exemplo, análises de confiabilidade, técnicas para previsão de falha ou, tampouco, por meio do uso de variáveis associadas a estas áreas.

Pressupõe-se que, para os equipamentos de cada linha de produção, um programa de atividades preventivas foi definido a partir do estudo do manual do fornecedor. As frequências de execução de cada atividade do programa de manutenção serão adotadas como premissas para o presente trabalho, tornando-se então restrições de destaque a serem respeitadas no desenvolvimento do processo de otimização do plano de manutenção preventiva.

Nada impede, entretanto, que dentro da sistemática de solução proposta, diferentes frequências de intervenções possam ser simuladas e conseqüentemente possam ser avaliados os custos resultantes. Em relação aos programas de manutenção, é assumido que a eficiência das atividades realizadas nos equipamentos das linhas de produção em estudo não sofrem alterações significativas e, portanto, os custos de manutenção uti-

lizados representam a média de desempenho operacional ao longo de todo o horizonte de programação.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, com conteúdos apresentados na seqüência.

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema da dissertação, a importância e os objetivos do trabalho. Neste capítulo, também são apresentados as limitações do trabalho e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é feita uma abordagem ao tema e seus objetivos através de uma revisão bibliográfica. Este capítulo encontra-se subdividido em três tópicos de pesquisa: manufatura contratada, manutenção industrial e otimização de processos. Já o terceiro capítulo, referente ao ambiente de pesquisa, a empresa alvo do estudo é apresentada, bem como o contexto em que está inserida.

O capítulo 4 apresenta a metodologia de pesquisa utilizada na parte prática deste trabalho, que constituiu um estudo de caso, relatando-se as justificativas desta escolha. No quinto capítulo, o problema é conceitualmente descrito. Este capítulo apresenta o processo de evolução do modelo bem como a modelagem proposta para o problema.

O capítulo 6 dedica-se à apresentação e análise dos resultados obtidos no estudo de caso. Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como recomendações de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Referencial Teórico

O tema abordado neste trabalho tem como uma de suas principais características a busca da integração de diferentes assuntos presentes nas empresas acerca da questão da manutenção preventiva. Desta forma, a pesquisa ateve-se aos seguintes temas: manufatura contratada, manutenção industrial e otimização de processos.

2.1 Manufatura Contratada

Conforme Sturgeon [43] , em resposta à crescente tendência das empresas asiáticas que passaram a produzir elevados volumes de produtos eletrônicos com alta tecnologia e baixo custo, desde meados de 1980, grandes empresas americanas passaram a orientar suas operações internas de manufatura para empresas de CM (*Contract Manufacturing*) ou EMS.

A estratégia adotada pelas empresas detentoras das marcas, segundo Torres [49], é a terceirização de todas as atividades que não têm relação direta com a empresa. Sendo assim, o projeto do produto e o marketing são mantidos em casa, enquanto que a manufatura, logística, a distribuição a maioria das funções de suporte são terceirizadas. Na Tabela 2.1 podem ser visualizadas as principais atividades das empresas EMS e OEM.

As empresas podem escolher a empresa prestadora de serviços de manufatura

que melhor se enquadre em seus objetivos de custo, qualidade e desempenho nas entregas. Dependendo do tipo de contrato, as empresas podem até escolher o local onde as operações deverão ser realizadas. De acordo com Sturgeon [42], com este modelo, as OEM podem focalizar na inovação e se tornarem organizacionalmente e geograficamente mais flexíveis.

Tabela 2.1: Atividades das Empresas OEM e EMS

Empresa	Atividades
OEM	<ul style="list-style-type: none"> - Definição do conceito do produto - Planejamento do produto - Projeto do produto - Distribuição no mercado
EMS	<ul style="list-style-type: none"> - Protótipo do produto - Produção em larga escala - Serviços pós-venda

Fonte: Adaptado de Alves [2]

A confiança das OEM nas estratégias de terceirização da manufatura tem aumentado significativamente. Isto se deve, em grande parte, à necessidade destas em lidar com problemas de capacidade de produção. Por exemplo: se uma empresa detentora de uma grande marca desenvolve um computador pessoal com características competitivas - preço, desempenho, etc - em relação aos seus concorrentes, esta empresa, através de empresas do segmento EMS, pode atingir rapidamente o volume de produção adequado sem correr os riscos tradicionais desta atividade. Neste sistema, a necessidade de construir uma grande capacidade produtiva deixa de ser uma barreira de entrada aos novos participantes ou concorrentes (STURGEON [42]).

Segundo Zysman [57], o fato das empresas OEM, cada vez mais, ampliar a sua atuação através da contratação de EMS instaladas em mercados anteriormente não atendidos pelos seus produtos se deve ao grande crescimento do mercado de produtos eletrônicos.

Diante da análise do mercado de manufatura contratada para a indústria eletrônica, realizada por Berger [5], é possível perceber a evolução no crescimento

do setor EMS. Em 2004, foram realizadas 47 transações, entre fusões ou aquisições, gerando um faturamento de 94 bilhões de dólares para as cinquenta maiores empresas. Já em 2005, estas cinquenta maiores empresas dividiram um mercado de 100 bilhões de dólares, o que pode ser considerado um grande avanço do setor, uma vez que em 1999 o faturamento foi de 56 bilhões (fonte: MMI-2006)¹.

2.2 Manutenção Industrial

A maioria dos artigos e trabalhos publicados referentes ao tema manutenção concentram-se na análise de variáveis de desempenho tanto dos equipamentos quanto da atividade de manutenção em si. Segundo Rocha [36], os principais indicadores explorados são os tempos médios de falha dos equipamentos e componentes, tempos médios de reparos, custos com mão de obra de manutenção, tamanho e número de equipes de manutenção. Já nos trabalhos mais quantitativos, os modelos propostos procuram quase sempre balancear as políticas de intervenção corretiva e preventiva, de forma a otimizar a utilização das mesmas.

No decorrer deste trabalho serão necessários alguns conceitos básicos relacionados à manutenção de equipamentos. Estes são descritos, de acordo com Santos [37], da seguinte forma:

- **Falha:** Término da habilidade ou impossibilidade de desempenhar a função requerida do equipamento. O aparecimento de uma falha modifica o estado do equipamento para indisponível, por atuação automática da proteção, ou por desligamento da unidade em caráter de emergência;
- **Defeito:** Alteração ou imperfeição do estado de um equipamento, não a ponto de causar o término da habilidade em desempenhar a sua função requerida, podendo o equipamento operar com restrições;
- **MC (Manutenção Corretiva):** É a execução de tarefas não-planejadas para restaurar as capacidades funcionais de equipamentos ou sistemas falhados.

¹Manufacturing Market Insider - <http://www.mfgmkt.com/>

- **MP** (Manutenção Preventiva): É a execução de tarefas de manutenção previamente planejadas.
- **MPd** (Manutenção Preditiva): É a execução de tarefas originadas do acompanhamento de parâmetros de condição ou desempenho do equipamento.

2.2.1 Evolução da manutenção

A evolução da manutenção está ligada à própria evolução humana, principalmente à sua luta para criar e conservar objetos que permitam um domínio cada vez maior da natureza.

Mesmo com o constante avanço tecnológico, tanto os produtos como os equipamentos de produção têm uma duração limitada e, certamente irão falhar em algum momento de suas vidas, daí a importância da manutenção para manter ou recuperar sua funcionalidade.

A manutenção envolve atividades ligadas a preservação e conserto do equipamento. No Novo Dicionário da Língua Portuguesa, Ferreira [14] define o termo manutenção, de forma genérica, como sendo "as medidas necessárias para conservar ou a permanência de alguma situação".

Na indústria, a consolidação do termo manutenção só ocorreu a partir de 1950, onde, inicialmente, foi classificada em três categorias: *(i)* manutenção preventiva, originada em 1951, com a intenção de checar o equipamento em intervalos fixos de tempo para evitar quebras devido ao desgaste do equipamento; *(ii)* manutenção corretiva, também denominada de manutenção reativa, que é realizada somente quando o defeito ocorre; *(iii)* prevenção da manutenção, originada em 1960, que é constituída de atividades que permitem melhorar o equipamento, deixando-o livre de manutenção (KODALI e CHANDRA [20]).

De acordo com Tondato [48], a manutenção sempre foi considerada um setor de suporte, com altos custos e sem produtividade para os negócios. Porém, nos últimos anos, indústrias têm adotado estratégias para aumentar a eficiência da manutenção.

Antes da Segunda Guerra Mundial, a manutenção era focalizada em consertos e reparos simples e sua sistemática não passava de limpezas superficiais e rotinas de lubrificação. No período pós-guerra, quando as indústrias tornaram-se mais complexas, surgiu a manutenção preventiva com objetivo de melhorar a confiabilidade e a qualidade dos equipamentos, como pode se observado na Tabela 2.2. A partir da década de 70, com o TPM (*Total Productive Maintenance*), a manutenção passou a ser vista como um sistema de gestão empresarial, com forte ênfase no ser humano (IMAI [18]).

Tabela 2.2: Evolução da Manutenção

	<u>Década de 50</u>	<u>Década de 60</u>	<u>Década de 70</u>
Período	- busca pela consolidação da função “desempenho”.	- inclusão dos conceitos de confiabilidade, segurança e economicidade dos sistemas de produção.	- ênfase no ser humano e na visão total do sistema.
Técnicas Administrativas	- Manutenção Preventiva (a partir de 1951); - Manutenção do Sistema Produtivo (a partir 1954); - Manutenção Corretiva com incorporação de Melhorias (a partir de 1957).	- Prevenção da Manutenção (a partir de 1960); - Engenharia da Confiabilidade (a partir de 1962); - Engenharia Econômica	- Ciências Comportamentais - Engenharia de Sistemas - Manutenção Produtiva Total

Adaptado de Nakajima [29]

Recentemente, de acordo com Wireman [54], *apud* Tondato [48], o gerenciamento da manutenção incorporou várias técnicas e metodologias de trabalho para o departamento de manutenção das indústrias:

- (i) Manutenção preventiva;
- (ii) Sistemas de inventário e estoque de peças de reposição;
- (iii) Sistemas de ordens de serviço;
- (iv) Sistemas computadorizados de gerenciamento da manutenção;
- (v) Treinamento;
- (vi) Envolvimento operacional;
- (vii) Manutenção preditiva;

- (viii) Manutenção centrada em confiabilidade;
- (ix) Manutenção Produtiva Total;
- (x) Melhoria contínua.

2.2.1.1 Manutenção preventiva

A MP é desempenhada para manter um item em condições satisfatórias de operação através de inspeções sistemáticas, detecção e prevenção de falhas incipientes (SANTOS [37]).

De acordo com Pardue *et al.*[31], *apud* Kodali e Chandra [20], o objetivo da periodicidade da manutenção preventiva é proporcionar um planejamento da manutenção, prolongando a vida útil do equipamento. A manutenção preventiva transforma a manutenção reativa ou corretiva em manutenção proativa. Esta mudança ocasiona redução nos custos de manutenção e ganho de eficiência dos equipamentos, uma vez que estes tendem a parar somente em momentos programados, evitando paradas inesperadas.

Para Wireman [54], *apud* Tondato [48], uma boa relação entre manutenção reativa e proativa prega que do total do tempo utilizado na manutenção do equipamento, 80% deva ser ocupado com ações preventivas e 20% com manutenção corretiva. Atingindo-se estes índices, pode-se afirmar que a MP vem sendo realizada com sucesso.

As vantagens do uso da manutenção preventiva são a diminuição da probabilidade da falha e o aumento do ciclo de vida do equipamento. A desvantagem é que freqüentemente deve-se parar o equipamento, em momentos programados, para realizar a manutenção (SWANSON [45]).

2.2.1.2 Estoque de peças de reposição

Segundo Takahashi e Osada [46], a falta de controle sobre o inventário pode causar efeitos negativos nas atividades de produção e manutenção. No gerenciamento atual da manutenção, as peças de reposição dos equipamentos são fatores chaves para a eficiência e eficácia da manutenção.

De acordo com Nakajima [28], o gerenciamento de peças de reposição deve buscar dois objetivos aparentemente conflitantes:

- (i) assegurar que as peças de reposição estejam disponíveis no momento da utilização;
- (ii) reduzir os custos de inventário, compra, recebimento e estocagem.

2.2.1.3 Sistema de ordens de serviço

Além da execução correta das atividades de manutenção, é importante que, durante a execução, os funcionários da manutenção registrem os serviços realizados e o resultado das inspeções. Para que todas essas atividades sejam executadas com sucesso, são utilizadas as OS (Ordens de Serviço). Ao término dos trabalhos, as OS torna-se parte do histórico dos serviços executados no equipamento (NAZARETH [30]).

Estes históricos de intervenções nos equipamentos são de grande importância tanto para a área de manutenção - que poderá ajustar as tarefas às necessidades apresentadas pelos equipamentos - quanto para a área de projeto ou de engenharia, que poderá trabalhar na melhoria do equipamento em questão e na prevenção de manutenção dos equipamentos que ainda serão projetados (NACIF, [24]).

2.2.1.4 Sistemas computadorizados de manutenção

Os sistemas computadorizados de gerenciamento da manutenção, também conhecidos como CMMS (*Computerized Maintenance Management Systems*), auxiliam o setor de manutenção e engenharia no gerenciamento dos dados através de computadores. Eti *et al.* [12] destaca que o *software* CMMS controla as funções da manutenção preventiva e fornece sustentação para um bom gerenciamento do setor de manutenção.

De acordo com Bohoris *et al.* [7], os sistemas CMMS fornecem também informações importantes sobre o equipamento, tais como a análise de falhas e relatórios de ações corretivas e preventivas. Entretanto, o maior benefício oriundo da utilização destes sistemas é a possibilidade de dispor de informação sobre a realização das atividades de manutenção em tempo real (BOHORIS *et al.* [7]).

Segundo Tsang [50], *apud* TONDATO [48], sistemas computadorizados permitem o cruzamento de informações de toda a organização, de forma a facilitar tanto o monitoramento de processos quanto a tomada de decisão pela gerência.

Gabbar *et al.* [15] discute a necessidade das indústrias controlarem as atividades de manutenção durante todo o ciclo de vida dos equipamentos. Os autores destacam, ainda, a importância da atualização de informações de circunstâncias operacionais e também estratégias de manutenção no sistema.

2.2.1.5 Treinamento

Segundo Nacif [24], a capacitação da equipe de manutenção é importante tanto para garantir elevado nível de manutenção quanto para conseguir realizar os serviços dentro do custo desejado, uma vez que a utilização de mão-de-obra treinada reduz a possibilidade de retrabalho.

Suzuki [44] afirma que as empresas devem prover meios que possibilitem o desenvolvimento de seus recursos humanos, de forma a garantir que funcionários exerçam seu pleno potencial. No caso específico da manutenção, treinamento deve garantir que os funcionários desenvolvam capacidade técnica para entender, inspecionar, operar e manter os equipamentos.

Para melhor controle da qualificação técnica dos funcionários, é interessante que se faça um levantamento periódico das necessidades de treinamento da equipe de manutenção e elabore um programa de treinamento por funcionário ao longo do período seguinte.

2.2.1.6 Envolvimento operacional

A necessidade do envolvimento operacional nas atividades de manutenção partiu da idéia de que os operadores poderiam contribuir para melhorias na manutenção, uma vez que estes estavam muito próximos dos equipamentos.

Segundo Nacif [24], uma vez que a manutenção dos equipamentos estava se tornando cada vez mais complexa, a possibilidade do departamento de manutenção

negligenciar a execução de reparos pequenos e de fácil execução era crescente, já que estas passaram a ser vistas como atividades secundárias.

Tondato [48] destaca que as atividades de manutenção desenvolvidas por operários podem variar de empresa para empresa, podendo incluir inspeções, limpeza, rotina de lubrificação, reparos mecânicos e coleta de dados. Nakajima [28] afirma que é responsabilidade do departamento de manutenção definir quais são as habilidades requeridas dos operadores para que estes executem corretamente as tarefas de manutenção que lhes forem designadas. De acordo com Wireman [54], *apud* Tondato [?], o acompanhamento diário dos equipamentos realizado pelos operadores, tende a melhorar o sistema de manutenção, diminuindo consideravelmente os tempos necessários para pequenos reparos

Pode-se descrever a evolução do envolvimento de operadores na manutenção em quatro períodos, apresentados na Tabela 2.3 . A migração de funções do setor de manutenção para o setor de operação ocorreu como forma de otimizar o uso dos equipamentos. Essa otimização se deu através do envolvimento operacional na manutenção preventiva e conseqüente diminuição de falhas.

2.2.1.7 Manutenção preditiva

De acordo com Swanson [45], o objetivo do programa de MPd é realizar um acompanhamento e mapeamento do desgaste dos equipamentos, intervindo antes que o mesmo falhe.

Nakajima [29] destaca que semelhantemente à preventiva, a manutenção preditiva reduz a probabilidade de defeitos. Porém, ao invés de ser executada em intervalos fixos de tempo, são feitas somente quando a necessidade é iminente.

2.2.1.8 Manutenção centrada em confiabilidade

Para Lafraia [21], a manutenção centrada em confiabilidade ou RCM (*Reliability Centered Maintenance*) é o tipo de manutenção em que se estudam e classificam os modos de falha, severidades, efeitos e possibilidades de ocorrência. Através de modelos

probabilísticos, determina-se o risco de uma operação sob certas circunstâncias. Com isso, o gestor de manutenção pode estimar até que ponto determinado equipamento poderá ser utilizado, garantindo uma produtividade ótima com custos mínimos.

Tabela 2.3: Transição das Atividades de Manutenção entre Departamentos

Período	Departamento de Produção	Departamento de Manutenção
I	- A unidade de produção possui alguns operadores aptos a executar reparos.	- Reparos ou tarefas executados sem nenhuma noção de responsabilidade (como se fossem serviços subcontratados); - Equipe de reparos não atua a não ser que explicitamente solicitada para a execução de uma tarefa específica.
II	- A unidade de produção concentra-se na produção e prevalece uma divisão do trabalho entre os setores de produção e manutenção; - A equipe de reparos é transferida ou designada “setor de manutenção”.	- Conserva-se na manutenção e conserva sua independência; - Noção de responsabilidade torna-se mais aguçada.
III	- O pessoal da produção tende a ter conhecimento limitado sobre os equipamentos; - Passa a ficar claro que a tecnologia de Manutenção Preventiva se enquadra entre as tecnologias de produção e processamento; - As inspeções diárias limitam-se apenas a casos simples.	- Níveis de conhecimento técnico e de engenharia são aprimorados através de técnicas de diagnóstico e atividades de manutenção preventiva.
IV	- Dependendo das características do local de trabalho, os operários começam a participar das atividades de manutenção. Entretanto, existem limitações devido aos níveis de conhecimento técnico limitações devido e número de etapas dos processos; - Além da manutenção diária, os operários também participam de atividades de manutenção periódica.	- Necessidade de maior número de funcionários para manutenção; - A equipe de produção demanda treinamento para desenvolver a noção de responsabilidade.

Fonte: Adaptado de Tondato [48]

Esta técnica enfoca a otimização do uso dos programas de manutenção preventiva e preditiva para melhorar a eficiência do equipamento enquanto minimiza os custos de manutenção. Devido a altos custos e resultados em longo prazo, a RCM torna-se um investimento que deve ter um planejamento prévio. Portanto, a escolha do equipamento deve ser algo que torne o seu investimento viável (DUNDICS [11]).

2.2.1.9 Manutenção produtiva total

A metodologia TPM foi desenvolvida no Japão; inicialmente visava à eficiência do sistema de manutenção, sendo que, com o aperfeiçoamento ao longo de 30 anos, se tornou um completo sistema de gestão empresarial.

Segundo Imai [18], TPM é um método de gestão que identifica e elimina as perdas existentes no processo produtivo, maximiza a utilização do ativo industrial e garante a geração dos produtos de alta qualidade a custos competitivos. Além disso, desenvolve conhecimentos capazes de reeducar as pessoas para ações de prevenção e de melhoria contínua, garantindo o aumento da confiabilidade equipamentos e dos processos envolvidos, sem investimentos adicionais.

Segundo Suzuki [44] a aplicação da metodologia TPM como sistema de Gerenciamento dos processos de operação e manutenção, visa a:

- (i) constituir uma estrutura organizacional que maximize a eficiência do sistema de produção, por meio da melhoria da qualidade dos equipamentos e da capacitação dos colaboradores;
- (ii) criar, no próprio local de trabalho, mecanismos para prevenir e eliminar as diversas perdas, buscando alcançar metas como: zero de acidente, zero de quebra-falha, tendo como objetivo o aumento do ciclo de vida total útil dos equipamentos e instalações;
- (iii) ter a participação de todos os colaboradores na implantação, desenvolvimento e manutenção do método;
- (iv) atingir perda zero por meio de atividades desenvolvidas por equipes de trabalho.

2.2.1.10 Melhoria contínua

Ballestero-Alvarez [3] destaca que a "melhoria contínua" implica na realização de melhoria nos produtos, processos, ou serviços com os objetivos de reduzir tempo de produção, melhorar a funcionalidade do local de trabalho, melhorar o atendimento a clientes, ou o desempenho de um produto. A Tabela 2.4 apresenta o comportamento das atividades que envolvem melhoramento contínuo no ambiente organizacional. Em relação às ações tomadas no melhoramento contínuo, conforme Deming [10], presume-se mais e menores passos de melhoramento incremental. Ou seja, pequenas ações de melhorias realizadas diariamente. A operacionalização da melhoria contínua se dá através de atividades em equipe e baixo custo para a organização (BALLESTERO-ALVAREZ [3]).

Tabela 2.4: Características da Melhoria Contínua

Efeito	longo prazo de duração, mas não dramático
Passo	pequenas ações
Armação de tempo	contínuo e incremental
Mudança	gradual e constante
Envolvimento	todos da organização
Abordagem	coletivismo - esforços de grupos e abordagem de sistemas
Estímulos	conhecimento tradicional e estado da arte
Riscos	dispersos, muitos projetos simultaneamente
Requisitos Práticos	requer pequeno investimento, mas grande esforço para mantê-lo
Crítérios de Avaliação	processos e esforços por melhores resultados

Fonte: Adaptado Ballestero-Alvarez [3]

2.2.2 Políticas de manutenção

Embora não se pretenda discutir em detalhes o que poderia ser considerado como um processo ideal de elaboração de uma política de manutenção para uma indústria, algumas questões correlatas devem ser abordadas visando dar a exata dimensão do escopo deste trabalho e o contexto onde o mesmo está inserido.

A maximização do aproveitamento das oportunidades de mercado e o atendimento aos compromissos de vendas dependem diretamente da distribuição adequada da capacidade produtiva, através de planos de produção e de manutenção construídos em sintonia.

Dentre as diferentes estratégias para o gerenciamento da manutenção, Savsar [38] classifica o sistema de produção em função da manutenção da seguinte forma:

1. *Sem política de manutenção:* Assume-se que o sistema de produção é completamente confiável e nenhuma política de manutenção é desempenhada.
2. *Apenas política de MC:* As atividades de manutenção são exercidas apenas quando o equipamento falha.
3. *Política de MC com MP com período fixo:* O equipamento está sujeito a MP no final de cada ciclo de produção (por exemplo uma semana) para eliminar as falhas devidas ao desgaste daquele ciclo. Independente de alguma MC ocorrer entre duas MP programadas, as operações da MP sempre serão realizadas conforme a programação anterior.
4. *Política de MC com MP baseada no período de vida:* A MP, que foi programada para ser realizada ao final de cada ciclo, é refeita sempre que uma MC ocorrer. A duração de cada ciclo continua sendo o mesmo. Esta política apresenta a seguinte lógica de raciocínio: quando uma MC é realizada, a necessidade da próxima MP programada é eliminada.
5. *Política de MC com MP desencadeadora de oportunidade:* Operações de MP são realizadas somente quando são desencadeadas por uma falha. Ou seja, se a falha que requer a MC ocorre, ela também desencadeia operações de MP. As operações das duas manutenções (MC e MP) são aplicadas juntas nos equipamentos no momento da falha.
6. *Política de MC com MP desencadeadora de oportunidade condicional:* A atividades da MP são realizadas em cada máquina na data programada (final de cada

ciclo) ou quando uma condição de oportunidade específica baseada na ocorrência da MC acontece. Um exemplo de condição de oportunidade seria a falha do equipamento no último um quarto do tempo do ciclo de programação da MP. Então, as atividades da MP serão realizadas em conjunto com as de MC e a necessidade da próxima MP é eliminada.

No ambiente organizacional, diferentes políticas de manutenção podem ser implementadas, tanto isoladamente quanto de forma combinada.

Sinteticamente, as principais políticas de manutenção que podem ser aplicadas são:

- manutenção a intervalos pré-fixados;
- manutenção baseada na condição de parâmetro;
- operar até falhar;
- manutenção por oportunidade;
- modificações de projeto.

Via de regra, as políticas de manutenção apresentam como principal objetivo a minimização do efeito da falha.

O aprimoramento das rotinas de inspeção e os avanços tecnológicos na área de instrumentação e controle têm, cada vez mais, facilitado a implantação de sistemas de monitoração dos parâmetros de deterioração de equipamentos, reduzindo a influência do efeito probabilístico na previsão da falha e, conseqüentemente, maximizando a vida útil dos mesmos.

Segundo Rocha [36], a política baseada nas condições de parâmetros pode ser implantada com sucesso em processos que operam em condições de redundância, com equipamento reserva, ou em sistemas produtivos mais simples, que operam com folga de capacidade, desde que a política atenda satisfatoriamente a relação de custo e benefício.

Entretanto, mesmo com todo o esforço voltado para o aumento da vida útil dos equipamentos através do aprimoramento da estratégia de manutenção por condição de parâmetro, a manutenção preventiva ainda ocupa um importante espaço na indústria.

De acordo com Pinto e Nascif [33], os principais fatores que influenciam na adoção da política de manutenção preventiva são:

- impossibilidade de aplicar a manutenção preditiva;
- aspectos relacionados com a segurança, tornando a intervenção obrigatória. Esta ocorre normalmente para substituição de componentes;
- aproveitamento de oportunidades, em equipamentos de difícil liberação operacional;
- riscos de agressão ao meio ambiente;

Segundo Bartholomew-Biggs *et al.* [4], existem dois tipos de classificação para as intervenções que podem ocorrer em um sistema durante seu ciclo de vida operacional:

O *RM* (Reparo Mínimo) - por exemplo, reposição de componentes quebrados - pode ocorrer sempre que uma falha acontece e supõe-se que após o reparo, o sistema retorna ao estado satisfatório em que se encontrava imediatamente antes da falha.

A *MP* - por exemplo, limpeza e lubrificação - acontece de acordo com uma programação pré-determinada, não sendo determinada por eventos específicos. O objetivo desta manutenção é reduzir a idade real do sistema, tornando-o mais eficaz.

Para Bartholomew-Biggs *et al.* [4], se as ações da *MP* restaurasse o sistema ao estado inicial de sua vida, essa seria considerada uma *MP* perfeita. Por outro lado, se as atividades da *MP* fossem simplesmente a de substituir componentes quebrados (como no *RM*) então não haveria nenhuma redução na idade efetiva do sistema.

Na prática, a MP pode ser vista como sendo imperfeita, com ações que diminuem a idade do sistema, porém sem torná-lo tão bom quanto novo. Esta notação de idade efetiva e manutenção imperfeita tem sido discutida por Nakagawa [25, 26, 27] e por Kijima *et al.* [19].

Para Pham e Wang [32], a manutenção pode ser classificada pelo grau em que a condição de operação do sistema é restaurada pela manutenção:

Manutenção Perfeita: as ações de manutenção são realizadas de tal forma que a condição de operação do sistema é restaurada completamente. Isto é, após a manutenção o sistema apresentará a mesma confiabilidade e conseqüentemente, probabilidade de falhas, que um sistema novo.

Manutenção Imperfeita: as atividades de manutenção desempenhadas não fazem o sistema ficar tão bom quanto novo, porém o torna mais jovem. Usualmente, assume-se que a manutenção imperfeita restaura o estado de operação do sistema para um ponto entre o estado 'tão bom quanto novo' e o estado 'tão ruim quanto velho'.

2.2.3 Planejamento e programação

Segundo Pinto e Grossmann [34], tanto o Planejamento (*Planning*) quanto a Programação (*Scheduling*), vistos no contexto industrial, apresentam como característica importante, procedimentos de alocação de recursos e equipamentos para executar o processamento de tarefas necessárias para a manufatura de produtos.

O Planejamento, de acordo com Birewar e Grossmann [6], trata de problemas no nível macroscópico, ou seja, relacionados à definição de metas de longo prazo. Já na Programação, o objetivo é gerar informações detalhadas sobre decisões de seqüenciamento de tarefas e alocação destas aos equipamentos disponíveis visando atender metas específicas definidas no Planejamento (BIREWAR E GROSSMANN [6]).

Apesar do avanço na representação dos problemas de Programação em modelos matemáticos, os principais desafios na área, segundo Rocha [36], continuam basicamente concentrados em:

- a) lidar com o aspecto combinatorial que potencializa o número de possibilidades a serem analisadas;
- b) representar adequadamente o domínio do tempo.

Em relação ao horizonte de tempo abordado nos problemas de Programação, apesar de normalmente trabalhar com menores períodos de tempo (dias ou semanas), observa-se que eventualmente alguns dos objetivos específicos desta atividade podem ser requeridos em problemas que envolvem visões de longo prazo.

2.3 Otimização de Processos

A Pesquisa Operacional (PO) foi originalmente definida, conforme Sherwin [39], como a aplicação de método científico em problemas operacionais. De acordo com Wagner [51], uma aplicação de PO envolve:

- (i) construir descrições ou modelos matemáticos, econômicos e estatísticos de problemas de decisão e controle para tratar situações de complexidade e incerteza;
- (ii) analisar as relações que determinam as conseqüências futuras prováveis de ações alternativas e planejar medidas apropriadas de eficácia de modo a calcular o mérito relativo de cada uma dessas ações. (Simulação).

Wagner [51] destaca que nas últimas décadas a pesquisa operacional provou continuamente ser uma abordagem poderosa e eficaz para resolver criticamente problemas gerenciais reais. A abordagem básica de PO envolve os seguintes critérios:

- Foco primário na tomada de decisão : implicações diretas para ação executiva;

- Avaliação baseada em critérios de eficácia econômica: tradeoffs - equilíbrio entre fatores gerenciais muitas vezes conflitantes;
- Modelagem matemática formal: dedução dos mesmos resultados a partir da mesma base de dados.

2.3.1 Modelos de manutenção preventiva

A importância crescente da manutenção tem gerado um aumento no desenvolvimento e execução de estratégias otimizadas da manutenção para melhorar a confiabilidade do equipamento, reduzindo tanto a ocorrência de falhas quanto os custos devido a deterioração do equipamento (WANG [53]).

2.3.1.1 Qualidade no sistema produção-manutenção

Levner *et al.* [22] estudaram a aplicação da técnica TQM (*Total Quality Management*) no sistema produção-manutenção. O problema foi tratado pelos autores como um problema de programação matemática inteira-mista multi critérios com rede tipo-PERT de restrições. O modelo proposto é dividido em três critérios ou subproblemas:

Subproblema 1

1º Critério: Expectativa dos custos totais.

Este subproblema busca encontrar a proporção ótima dos custos de qualidade e de produção, dado pela seguinte equação:

$$F_1 = CP + CQ,$$

onde:

F_1 = custo total;

CP = custo de produção;

CQ = custo de qualidade.

- O custo de produção (CP) é dependente da duração das operações do processo produtivo.

- O custo de qualidade (CQ) é igual a combinação de três grandes despesas: custo de prevenção, custo de inspeção e custo de retificação de falha (correção).

Subproblema 2

º *Critério*: Confiabilidade do sistema.

Este subproblema busca localizar e eliminar as maiores fontes de produção defeituosa. A equação de confiabilidade do sistema em um determinado período de tempo $[0, T]$ é dada pela seguinte equação:

$$F_2 = 1 - \sum_{i \in U} p_i$$

onde:

F_2 = confiabilidade do sistema;

p_i = probabilidade da unidade i falhar;

U = conjunto de todas unidades i

- Esta equação assume que as falhas nas unidades são extremamente raras e que a probabilidade de falha p_i é pequena, ou seja, $p_i \ll \frac{1}{N}$, sendo N o número de unidades.

Subproblema 3

º *Critério*: A qualidade da produção.

Este subproblema busca determinar a qualidade do sistema de produção através da satisfação dos pedidos dos clientes.

$$Q_j = \mu_j(t_j)$$

onde:

Q_j = qualidade da operação de produção j ;

t_j = duração da operação j ;

$\mu_j(t_j)$ = estimativa de especialistas que reflete a "função qualidade"

do sistema, sendo $0 \leq \mu_j(t_j) \leq 1$;

Solução do Problema

Levner *et al.* [22] sugere a solução do problema em três estágios.

No primeiro estágio é encontrada a solução ótima para o 1º e 2º critérios. O problema obtido no 1º critério pertence a uma classe de problemas de programação matemática, denominada problemas de custo mínimo ou rede PERT generalizada. O autor cita os trabalhos que apresentam algoritmos eficientes para resolver os problema do 1º e 2º critérios. Já o 3º critério, conforme mencionado anteriormente, é medido por especialistas.

No segundo estágio, é verificado se a solução local obtida no primeiro estágio para qualquer um dos dois subproblemas é também a solução para o outro subproblema. Se esta condição for verdadeira, a solução encontrada é o ótimo global.

Senão, no terceiro estágio, utilizam-se estimativas de especialistas tanto da produção quanto da manutenção para determinar a solução do problema, de forma a garantir os níveis esperados de confiabilidade e qualidade da produção.

2.3.1.2 Alocação de mão-de-obra para MP

De acordo com Wagner *et al.* [52], a tarefa de programar a manutenção preventiva usualmente envolve determinar o instante de tempo em que a mão-de-obra é alocada para uma revisão de componentes principais ou grupo de componentes de um equipamento.

Wagner *et al.* [52] propõe 5 modelos de programação linear inteira para resolver o problema de programação da manutenção preventiva. As variações dos modelos propostos pelo autor ocorrem basicamente na função objetivo, apresentando diferentes critérios de otimalidade.

Especificamente, com o uso dos modelos, busca-se encontrar uma programação da manutenção preventiva que seja factível em relação à alocação da mão-de-obra requerida, minimizando a flutuação deste recurso ao longo do horizonte de programação.

A modelagem matemática proposta pelo autor foi:

Dados do Modelo

- S : conjunto de semanas ou horizonte de programação;
- P : conjunto de projetos;
- S_p : conjunto das possíveis datas para início do projeto p ;
- T_p : número de semanas necessárias para a realização do projeto p .
- $M_{p,t}$: número de homens hora necessários para a execução do projeto p na semana t .

Variáveis

- $X_{p,s} = \begin{cases} 1, & \text{se o projeto } p \text{ é iniciado na semana } s; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $D(w)$: desvio da mão-de-obra requerida entre a semana w e $w + 1$;
- $D_{p,t} = \begin{cases} M_{p,t} - M_{p,t+1}, & \text{se } 1 \leq t \leq T_p; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- G_w : aumento da mão-de-obra requerida entre a semana w e $w + 1$;
- H_w : decréscimo da mão-de-obra requerida entre a semana w e $w + 1$.

Modelo

$$\text{minimizar } Z = \sum_{w=1}^{S-1} G_w + H_w \quad (2.1)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{s \in S_p} X_{p,s} = 1 \quad \forall p = 1, 2, \dots, P \quad (2.2)$$

$$M_{p,t} - M_{p,t+1} = D_{p,t} \quad \forall p = 1, 2, \dots, P \quad (2.3)$$

$$1 \leq t \leq T_p$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{s \in S_p} D_{p,w-s+1} X_{p,s} = D(w) \quad \forall w = 1, 2, \dots, S-1 \quad (2.4)$$

$$D(w) + G_w - H_w = 0 \quad \forall w = 1, 2, \dots, S-1 \quad (2.5)$$

$$G_w \geq 0 \quad \forall w = 1, 2, \dots, S-1 \quad (2.6)$$

$$H_w \geq 0 \quad \forall w = 1, 2, \dots, S-1 \quad (2.7)$$

onde: $G_w - H_w =$ variação da mão-de-obra requerida entre a semana w e $w + 1$ do calendário.

- A restrição 2.2 garante que o projeto p terá seu início exatamente em uma semana s do horizonte de programação.

- A restrição 2.3 apresenta a variação na demanda de mão-de-obra para o projeto p entre as semanas do projeto t e $t + 1$.

- Já a restrição 2.4 apresenta o cálculo do desvio total da demanda de mão-de-obra requerida para a realização de todos os projetos, entre as semanas w e $w + 1$ do horizonte de programação.

- Uma vez calculado o desvio total, a restrição 2.5 apresenta o acréscimo (G_w) e o decréscimo (H_w) entre as semanas w e $w + 1$.

- As restrições 2.6 e 2.7 garantem que os aumentos e decréscimos da mão-de-obra são positivos. O desvio é calculado subtraindo-se (H_w) de (G_w).

Este modelo foi implementado na linguagem de programação *GNU MathProg*,

utilizando o *software* GLPK (*GNU Linear Programming Kit*) e testado em um computador ATHLON® Dual Core 3800+, 2 GHz com 1 GB de memória RAM no *prompt* de comando da plataforma Windows XP Pro.

A reprodução do modelo gerou os mesmos resultados apresentados no trabalho dos autores, como pode ser observado no Apêndice A.

Capítulo 3

Ambiente de Pesquisa

Este capítulo tem como objetivo apresentar a empresa pesquisada, situando-a no contexto em que está inserida, bem como descrever a problemática da otimização do planejamento da manutenção preventiva.

3.1 Cenário

Nos últimos anos, observou-se a crescente penetração dos produtos de eletrônica na economia. Cada vez mais estão presentes nos serviços, na indústria em geral, nos setores de informática e telecomunicações e nos bens de consumo. Isto se deve, em grande parte, ao tratamento diferenciado que receberam em nosso País. Como resultado comum, as diversas políticas levaram à instalação de um parque industrial, com grande presença de empresas multinacionais, no qual prevalece a montagem final de equipamentos (TAVARES [47]).

A Figura 3.1 mostra o desempenho do setor eletroeletrônico. A evolução do faturamento da indústria eletroeletrônica vem apresentando grande avanço desde 1998, sendo que em 2006, o crescimento previsto era de 14% em comparação com o ano 2005 (ABINEE [1]).

Uma importante característica deste setor é a forte presença de empresas do tipo manufatura contratada. Este mercado é organizado de forma que as empresas

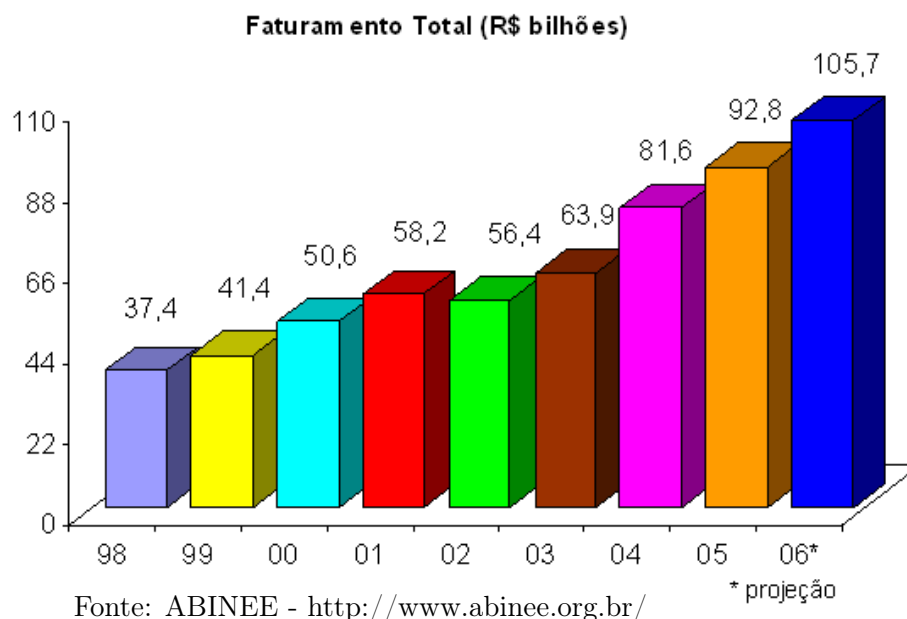


Figura 3.1: Faturamento do Setor Eletroeletrônico

proprietárias das marcas, conhecidas como OEM, são responsáveis pelos projetos de produtos, divulgação da marca (marketing) e demais atividades estratégicas. Já as empresas que fornecem o serviço de manufatura para indústria de eletroeletrônicos, conhecidas como EMS, são responsáveis pelas operações logísticas de obtenção de componentes e distribuição dos produtos finais, montagem dos produtos, manutenção dos equipamentos entre outros.

Como as empresas EMS devem ser capazes de responder rapidamente às variações da demanda, apresentando flexibilidade no processo produtivo, a aplicação de técnicas que visam minimizar custos, buscando equilibrar interesses conflitantes, possibilita o aumento da qualidade dos produtos e confiabilidade de entrega, bem como maior vantagem competitiva em relação aos demais concorrentes.

3.2 A Empresa

A empresa objeto da pesquisa é uma multinacional que atua no mercado de produtos de informática e eletroeletrônicos. Por motivos de sigilo empresarial, foi alterado o nome da empresa, aqui designada como BETA.

A BETA é uma empresa prestadora de serviços de manufatura de produtos

eletroeletrônicos que atende mundialmente a grandes clientes. Sua operação está orientada para a montagem de placas de circuito impresso (PCB - *Printed Circuit Board*) a baixo custo.

A empresa BETA atua no mercado brasileiro com duas plantas industriais, uma no Sudeste do Brasil e outra no Norte do país. Dentro das unidades brasileiras, a planta do Norte do país atua com alto volume de produção e baixo mix, ao contrário da planta do Sudeste que atua com um baixo volume e alto mix de produtos (HMLV - *High-mix, Low-volume*).

De acordo com Farlow [13], a tendência das empresas de montagem de PCB é de se aproximarem cada vez mais da estrutura de produção HMLV, ou seja, produzir grande variedade de produtos em pequenas quantidades. Esta tendência pode ser explicada pela demanda altamente volátil bem como o curto ciclo de vida dos produtos.

Atualmente, a BETA se depara com um quadro de crescimento acelerado. Para conseguir atender toda a demanda proposta por seus clientes, a BETA, que no final de 2003 operava com apenas duas linhas de produção SMT, teve seu quadro aumentado para nove linhas de produção, que representou um acréscimo de 49 novos equipamentos para a manufatura.

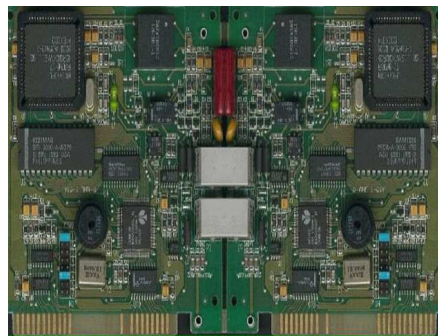
Com esta expansão, a realização das tarefas de manutenção preventiva nos equipamentos tornou-se desorganizada, aumentando consideravelmente o intervalo de tempo entre manutenções preventivas. A principal consequência desta falha na execução dos planos de manutenção foi o considerável aumento de *downtime* (tempo de parada) nas linhas de produção, devido à necessidade de ações corretivas nos equipamentos.

3.3 Tecnologia de Fabricação

Raback e Sischman [35] definem PCB, ilustrado na Figura 3.2, da seguinte forma:

Placas de circuito impresso consistem de placas de su-

porte não condutor (geralmente plásticos como fenolite ou epóxi), com espessura entre 1,5 a 2,0 mm, contendo trilhas de material condutor (geralmente cobre) na sua superfície. Cada placa tem definida, conforme seu projeto, as posições onde os componentes eletrônicos, tais como resistores, capacitores, diodos, transistores ou circuitos integrados, deverão ser montados para que ela execute a sua função específica no sistema.



Fonte: MMI - <http://www.mfgmkt.com/>

Figura 3.2: Placa de Circuito Impresso

As tecnologias de processo utilizadas para produção de PCB são SMT, em que os componentes SMD (*Surface Mount Device*) são inseridos automaticamente nas superfícies das placas, e PTH (*Pin Through Hole*), cuja inserção dos componentes às placas é feita manualmente.

A linha de produção PTH, apresentada na Figura 3.3 é constituída basicamente por sete processos:

- (1) Pré-Formatação: nesta etapa os terminais dos componentes são alinhados ou dobrados.
- (2) Inserção Manual: etapa do processo em que os componentes de maior tamanho são adaptados às placas.
- (3) Solda Onda: etapa em que os componentes são soldados.

- (4) Teste de Circuito e Teste Funcional: etapas cuja finalidade é avaliar defeitos em circuitos e funcionais, respectivamente.
- (5) Acabamento.
- (6) Reparo: nesta etapa, são realizados ajustes nas placas com defeitos de montagem.
- (7) Embalagem: etapa em que ocorre o acondicionamento das placas.



Figura 3.3: Linha de Produção PTH

3.4 Descrição do Processo Produtivo

Antes do processo de produção de PCB ser descrito é interessante ressaltar particularidades acerca do layout da produção da empresa BETA.

A organização do processo produtivo foi feita de forma que os equipamentos ou postos de trabalho fossem dispostos de acordo com sua função, o que caracteriza o layout como funcional.

Observando a Figura 3.4, que apresenta o arranjo físico deste processo, é possível verificar a disposição das estações de trabalho, bem como os recursos disponíveis para a fabricação das placas - matéria-prima, equipamentos, testadores, postos de trabalho e operadores.

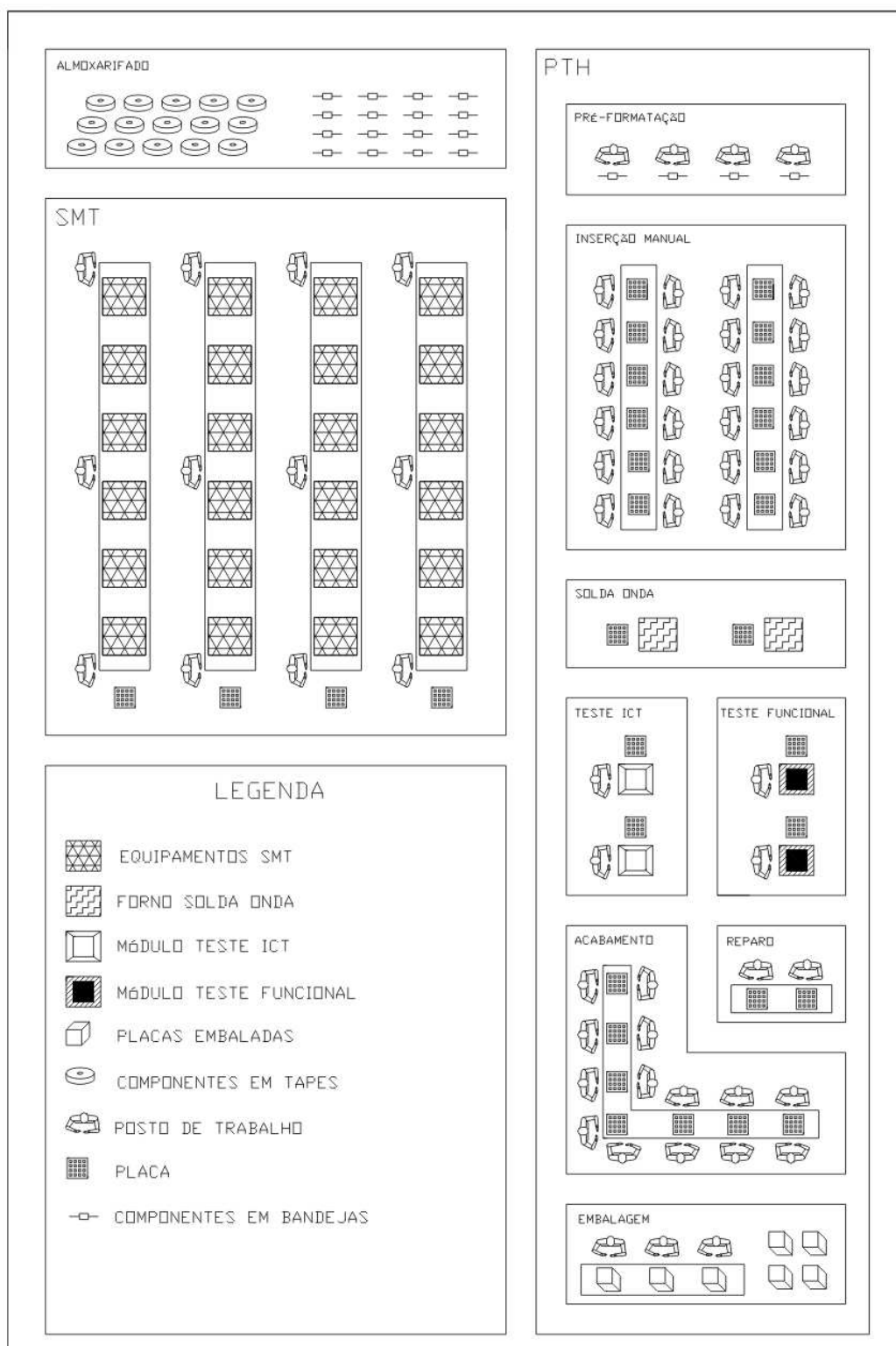


Figura 3.4: Montagem de Placas de Circuito Impresso

A Figura 3.5 apresenta as etapas de produção das PCB, que abrangem desde a chegada da matéria-prima até a expedição do produto acabado.

Grande parte da matéria-prima da empresa é importada. Esse material chega em caminhões e é descarregado na área de recebimento até serem transferidos ao almoxarifado.

Porém, antes que a matéria-prima seja armazenada, o setor de Controle de Qualidade (CQ) realiza a inspeção em uma amostra do material recebido. O material aprovado pelo CQ é, então, armazenado nos almoxarifados até que seja requisitado por uma Ordem de Produção (OP) do SMT¹.

As linhas de produção SMT são formadas por máquinas de montagem automática rigidamente interligadas que posicionam e soldam os componentes eletrônicos em locais específicos da placa de circuito impresso.

A primeira etapa do processo de produção SMT é realizada pela Printer. Este equipamento faz a impressão de pasta de solda, que é uma liga de estanho, chumbo entre outros produtos. A finalidade desta pasta de solda é fazer a ligação elétrica entre os componentes e a placa de circuito impresso.

Na etapa seguinte, a placa passa pelas insersoras automáticas de componentes², cuja função é posicionar os componentes em seus devidos lugares em alta velocidade. A BETA contém três tipos de insersoras: (i) de componentes pequenos embalados em tapes³: FUJI e HSP; (ii) de componentes maiores embalados em tapes: GSM; (iii) de componentes maiores embalados em bandejas: PTF. Normalmente, as máquinas insersoras de componentes maiores ficam posicionadas depois das outras insersoras.

Na próxima etapa, a placa é transferida por uma correia transportadora até o Forno contínuo para soldar os componentes SMD nela inseridos. Ao sair do forno, a placa passa por uma Inspeção visual, onde são verificados possíveis defeitos ocorridos nas etapas anteriores do processo. Terminado o processo SMT, as placas são levadas à área de processo PTH.

¹SMT: Na BETA, o nome do setor de produção é o mesmo da tecnologia de fabricação utilizada. Ou seja, o setor SMT é aquele onde utiliza-se a tecnologia de montagem em superfície.

A primeira etapa do PTH é a pré-formatação. Nesta etapa, os componentes PTH são dobrados ou cortados para serem inseridos à placa. Na Inserção Manual, os componentes maiores são inseridos manualmente nos respectivos furos da placa de circuito impresso. Na etapa seguinte, a placa passa pela Solda a Onda, onde os componentes maiores são fixados à placa por uma onda de solda.

Depois de passar pelas operações de montagem, a placa segue para a área de testes. O primeiro teste feito é o ICT (*in circuit test*), em que são realizados testes nos componentes determinados pelo cliente. Depois, a placa segue para os testes Funcionais, onde é verificado o funcionamento da placa.

Na etapa de Acabamento, são colocados alguns componentes e realizado o alguns reparos na placa. Na Embalagem, a placa é embalada e enviada a um estoque de produtos acabados e semi-acabados.

A partir daí, a placa pode ter dois destinos: (1) *Box Build* - Área de montagem das placas em produtos como: Impressoras, terminais de cartão de crédito entre outros e (2) Venda - Nacional ou Exportação.

3.5 Descrição da Manutenção Preventiva na Empresa

A Manutenção Preventiva ocorre em apenas um dos três turnos de trabalho da BETA, normalmente no terceiro turno (das 22:20 às 06:20h). As ações de MP de um determinado dia de trabalho são determinadas pelo Programa de Manutenção. Estas ações incluem a definição das linhas de produção e dos projetos de manutenção que serão executados.

Nesta seção são apresentados os projetos, planos e padrões de manutenção adotados pela empresa BETA. A seguir, apresenta-se a formação da equipe de manutenção bem como as responsabilidades de cada membro da equipe. Na última parte

²Os componentes SMD possuem diversos tamanhos, formatos e tipos de embalagens. A escolha das máquinas que irão inserir cada componente depende diretamente das características dos componentes.

³Componentes embalados em *tapes*: os componentes embalados em uma espécie de rolos ou discos, que são colocados em alimentadores (*feeders*) que acoplam às máquinas.

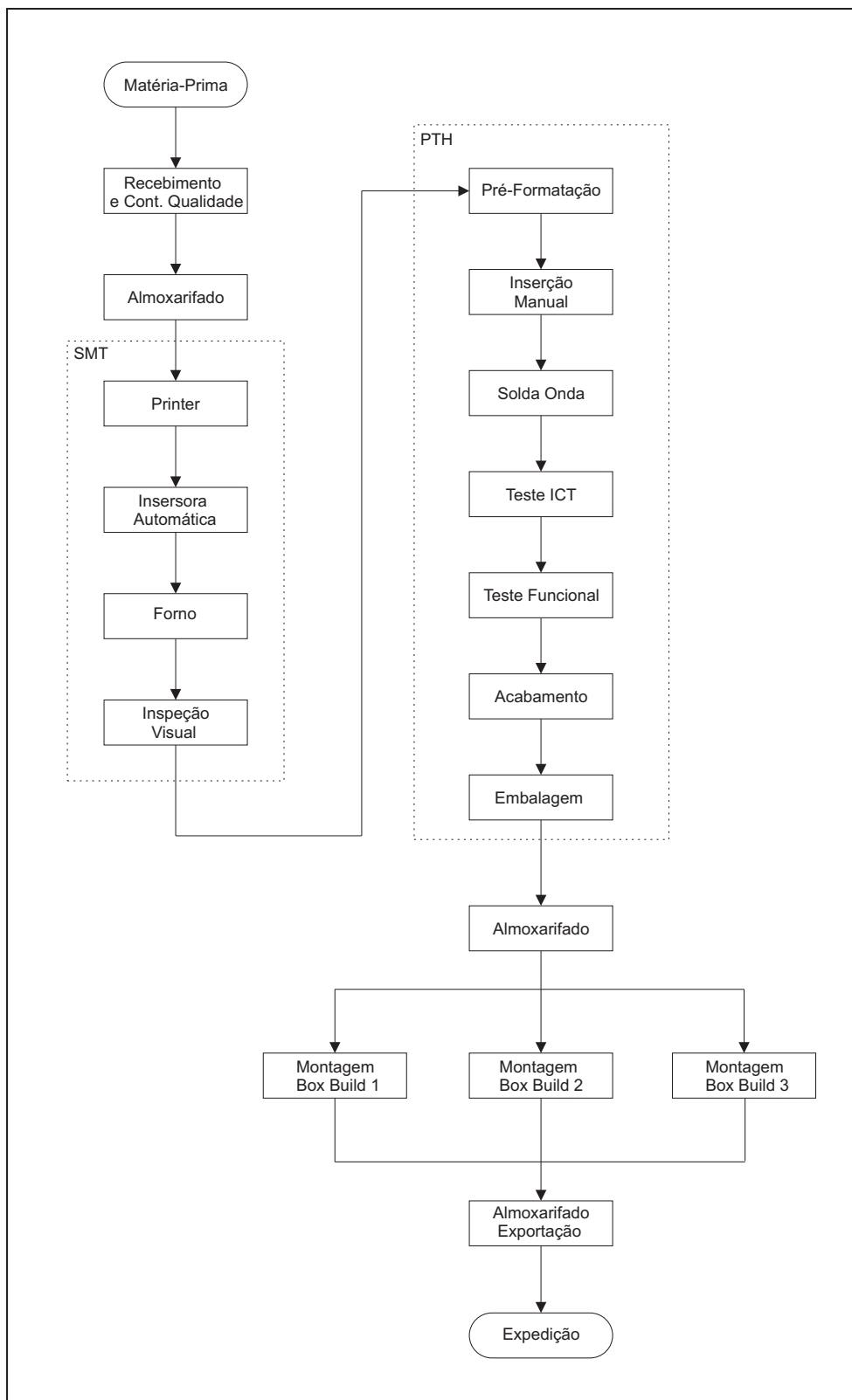


Figura 3.5: Fluxograma do Processo de Produção de PCB

desta seção são apresentadas tanto a descrição da execução das tarefas, quanto as particularidades das atividades de manutenção na empresa BETA.

3.5.1 Projetos de manutenção

As atividades de manutenção preventiva exercidas nos equipamentos das linhas SMT da empresa BETA são divididas em sete projetos de acordo com sua periodicidade de execução. A Tabela 3.1 apresenta estes projetos e exemplos de tarefas ou atividades de cada um.

Tabela 3.1: Projetos de Manutenção Preventiva da Empresa

Projeto	Frequência	Tarefas
1	Diária	Inspecionar e limpar a câmara de vácuo (Printer); Retirar componentes caídos na máquina (Inersora).
2	Semanal	Limpar os filtros de ar da máquina (Printer); Limpar a superfície do prisma(Inersora).
3	Quinzenal	Limpar o sistema de corte de fitas de componentes e lubrificar as hastes de movimento dos nozzles (Inersora).
4	Mensal	Inspecionar a pressão dos alimentadores (Printer); Lubrificar a máquina (Inersora).
5	Trimestral	Inspecionar as correias de movimentação dos rodos (Printer); Limpar os filtros de ar comprimido e vácuo (Inersora).
6	Semestral	Inspeção e limpeza do sistema de vácuo (Printer); Limpar e lubrificar os Feeders (Inersora).
7	Anual	Inspeção e limpeza das partes eletrônicas (Printer); Trocar o óleo da máquina (Inersora).

As tarefas que constituem cada projeto de manutenção foram definidas a partir das recomendações descritas no manual de instruções dos fornecedores dos equipamentos.

3.5.2 Planos de manutenção

Um plano de manutenção define as tarefas preventivas que devem ser executadas em um determinado equipamento, bem como a periodicidade de cada uma.

Xenos [55] destaca que o processo de elaboração e revisão dos planos de manu-

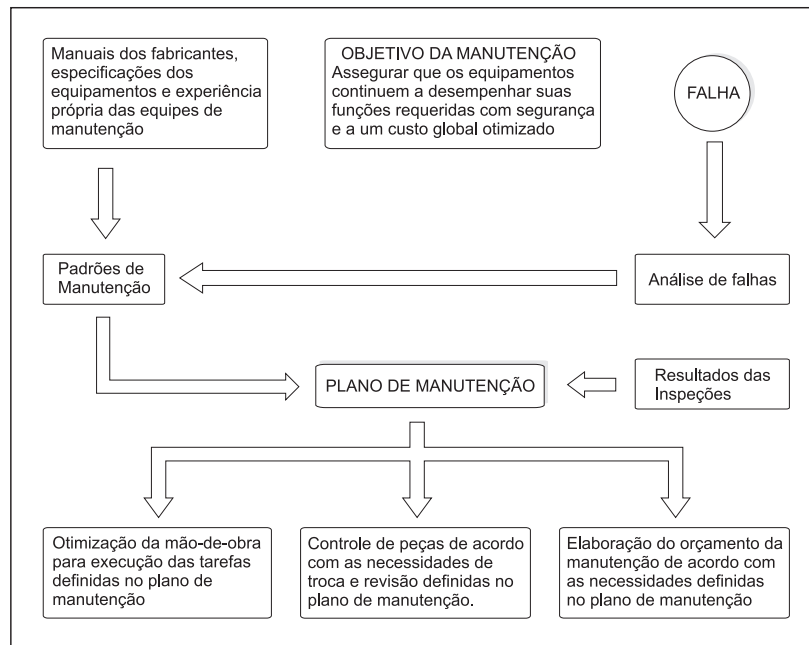


Figura 3.6: O Plano de Manutenção como do Gerenciamento da Manutenção

tenção é o cerne do gerenciamento de manutenção, como pode ser observado na Figura 3.6. O autor ainda destaca que, a partir dos planos de manutenção, é possível obter informações para o gerenciamento de grande parte dos recursos relacionados à manutenção, como peças de reposição e mão-de-obra.

Segundo Nakajima [28], as principais fontes de informação para a elaboração de planos de manutenção, são:

- Padrões ou instruções fornecidos pelo fabricante.
- Dados históricos de falhas do equipamento em questão ou de equipamentos similares.
- Experiência das equipes de operação e de manutenção no equipamento em questão ou similares.
- Legislações regulatórias: como no caso de manutenção de caldeiras e aviões.

A BETA possui planos de manutenção elaborados para praticamente todos os

equipamentos do SMT. Esses foram elaborados pelo supervisor e técnicos da manutenção seguindo as recomendações dos fabricantes e a experiência da equipe, tal como sugerido por Xenos [55] e Nakajima [28]. A Figura 3.7 apresenta o plano de manutenção de uma inseridora automática de componentes do SMT.

Plano de Manutenção Preventiva			Equipamento: GSM II															
Tarefas	Frequência	Ferramenta / Material	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Limpar o interior da máquina retirando a sujeira, componentes e fragmentos	Diária	Aspirador	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar a superfície das câmeras. Usar papel especial para limpeza de lentes	Semanal	Papel especial	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar as escalas dos lineares dos eixos Y e X (Beam 1 e Beam 2)	Semanal	Papel especial e álcool	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Verificar a pressão do "Beijo de Ar (Air Kiss)" e o vácuo dos Spindles	Semanal	Vide FI PP 225	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar e verificar o aspecto físico dos Nozzles (desgaste e limpeza)	Quinzenal	Pano limpo e seco	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar os Nozzle Changers	Quinzenal	Pano limpo e seco	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Verificar o vácuo dos Nozzle Changers	Quinzenal	Vide FI PP 225	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar os filtros de ar das tampas e trocar quando necessário	Quinzenal	Jato de ar comprimido	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar as coberturas de policarbonato e tampas	Quinzenal	Pano limpo	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar os Trackballs e teclados	Quinzenal	Pano limpo	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Purgar filtro pneumático	Quinzenal		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Backup dos arquivos: Product Files e Component Databases	Quinzenal	Disquetes	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar e lubrificar (Kluber) os trilhos (Slides) e fusos (Lead Screw) dos eixos X e Y	Mensal	Kluber	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar e lubrificar os trilhos e fusos de abertura do Conveyor (Board Handling)	Mensal	Tetra Oil	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Inspeccionar as correias do Conveyor verificando desgastes e limpeza	Mensal	Pano limpo	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Desmontar e lavar os filtros pneumáticos	Mensal	Água	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Verif. a roda do tacômetro do sist. de posicionamento (trocar e aj. se necessário)	Trimestral		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Limpar e lubrificar os Feeders (vide FI PP 225)	Semestral	Lubrif. Super Blue	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Executado por:			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Data da manutenção:			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Padrão de Referência 15-ME30-1000-225

Figura 3.7: Plano de Manutenção Preventiva da Inseridora Automática GSM

Os planos de manutenção da BETA não têm sido realimentados, ou seja, não têm sido atualizados através da inserção, retirada ou modificação da periodicidade das tarefas ou mesmo das atividades em si. Essa realimentação é importante, pois as necessidades operacionais dos equipamentos mudam com o tempo. A principal consequência da falta de revisão nos planos de manutenção é que as tarefas executadas em cada equipamento podem ficar desatualizadas em relação às necessidades dos equipamentos. Além da possibilidade de desperdícios de recursos com a execução de tarefas que não são mais necessárias.

3.5.3 Padrões de manutenção

Enquanto os planos de manutenção detalham "o que" deve ser feito e "quando", o padrão de manutenção detalha "como" a tarefa deve ser realizada, ou seja, o padrão de manutenção detalha as etapas de execução da tarefa, as ferramentas utilizadas, os

parâmetros a serem ajustados e os cuidados a serem tomados, de forma que a tarefa seja executada da melhor maneira possível.

Na BETA, quase todos os equipamentos possuem padrões de manutenção, ou fichas de instruções, cadastrados no departamento de qualidade. A Figura 3.8 apresenta a ficha de instrução de manutenção preventiva de uma insersora automática.

Para os equipamentos novos que ainda não possuem seus padrões elaborados, as atividades de manutenção ficam restritas à limpeza superficial do mesmo. Já para os equipamentos antigos, cada operador executa as atividades de maneira específica, que nem sempre é a ótima. Isto faz com que a qualidade da realização dos serviços fique prejudicada.

3.5.4 Equipe de manutenção

Para executar as tarefas, pode-se contar basicamente com duas equipes: a equipe de operação e a equipe de manutenção. Normalmente, a equipe de manutenção é formada por um pessoal mais qualificado e bem remunerado, mas que não fica ao lado do equipamento durante todo o tempo de trabalho. Já a equipe de operação é normalmente formada por um pessoal menos qualificado, mas que permanece um grande período de tempo ao lado do equipamento.

Como o SMT da BETA é composto por linhas de produção, quando ocorre a intervenção em uma determinada linha para execução da MP, todos os equipamentos desta linha sofrem ações de manutenção. Para que seja possível realizar atividades da manutenção programada em todos os equipamentos, a BETA conta, atualmente, com o apoio de duas equipes de MP para as nove linhas de produção do SMT. Cada equipe é composta por dois operadores de manutenção além dos dois operadores da linha de produção.

Durante a realização da MP, o técnico da linha auxilia e supervisiona as atividades executadas pelos operadores.

Na empresa existem dois tipos de operadores:

Procedimento de Manutenção Preventiva

ENGENHARIA DE MANUFATURA

Manutenção Preventiva da GSM2	15-ME30-1000-225-E
-------------------------------	--------------------

LISTA DE DISTRIBUIÇÃO
Montagem SMT de placas

1 - OBJETIVO:

Descrever os procedimentos de manutenção preventiva para o equipamento GSM2.



2 - PROCEDIMENTO:

2.1 - Manutenção quinzenal

- 1 - Verificar o aspecto físico dos Nozzles (desgaste e limpeza). Limpar com pano seco caso seja necessário.
- 2 - Limpar a superfície das câmeras (UL Câmera). Usar papel especial para limpeza de lentes.
Obs.: - O papel deve ser passado suavemente no vidro da câmera.
- Toda gordura, sujeira e/ou graxa que por ventura venha a contaminar a câmera devem ser removidas.
- Todo cuidado deve ser tomado para que a câmera não seja arranhada.
- 3 - Limpar os Nozzle Changers.
- 4 - Limpar as escalas dos lineares dos eixos Y e X (Beam 1 e Beam 2). Utilizar papel que não solte fiapos umedecidos em álcool isopropílico.
Obs.: - O sentido de limpeza deve ser único.
- O papel deve ser passado suavemente na escala.
- Toda gordura, sujeira e/ou graxa que por ventura venha a contaminar a escala devem ser removidas.
- Todo cuidado deve ser tomado para que a escala não seja arranhada.

Elaboração:

Verificação:

Aprovação:

15-ME30-1000-225-E

Data: 02/01/2006

Figura 3.8: Padrão de Manutenção Preventiva da Inserora Automática GSM

- (i) Operadores de Linha: são funcionários dedicados às operações de produção, tendo como principal função o monitoramento dos equipamentos. São também responsáveis pela execução das tarefas do Projeto de MP Diária além de auxiliar na realização dos demais projetos de MP. Cada linha de produção é composta por dois operadores de linha, além de inspetores e equipamentos.
- (ii) Operadores de Manutenção: geralmente são operadores de linha mais antigos, que foram treinados para realizarem as atividades de manutenção, trabalhando apenas no turno em que a MP é realizada. A BETA conta com duas equipes de MP, sendo que em cada uma há dois operadores de manutenção.

O envolvimento dos operadores na função de manter os equipamentos é devido, principalmente, aos princípios do programa TPM, em fase de implantação na BETA. Esta técnica é fundamentada em três conceitos básicos, que são:

1. manutenção autônoma feita pelos operadores;
2. maximizar a eficiência dos equipamentos;
3. pequenos grupos de atividades.

De acordo com a filosofia TPM, a Manutenção Autônoma corresponde à execução de atividades simples, como lubrificação, calibração, limpeza e inspeção visual, realizadas pelos próprios operadores. A BETA já trabalha com esta estrutura, adicionando na rotina dos operadores de linha algumas atividades de manutenção. Porém, muitas tarefas de manutenção ainda podem ser delegadas para a produção.

Em relação à mão-de-obra técnica disponível na BETA, percebe-se que o nível e a frequência dos treinamentos são deficientes, além da empresa contar com um número reduzido de técnicos. Como consequência, a empresa BETA completa a lacuna de mão-de-obra com os operadores, que neste caso são designados como "operadores de manutenção".

3.5.5 Realização das tarefas

Atualmente, o único indicador utilizado para avaliar as ações de manutenção é o tempo de parada (*downtime*) de máquinas. A Tabela 3.2 apresenta a produtividade geral do SMT no mês de fevereiro de 2006.

Percebe-se um alto índice de paradas dos equipamentos para manutenções corretivas, o que consome um tempo expressivo que deveria ser utilizado para a produção. Isso pode ser explicado pelas condições dos equipamentos existentes na fábrica ou pelo nível de experiência dos trabalhadores. Porém, o principal agravante desta situação é a falta de disciplina na execução das tarefas de prevenção nos equipamentos.

Tabela 3.2: Produtividade Geral do SMT

Fevereiro de 2006			
ITENS	DESCRIÇÃO	Hs Paradas	%
1	Printer	137,45	8,85
2	HSP	154,86	9,97
3	GSM	136,06	8,76
4	Fuji	47,55	3,06
5	Conveyor	21,94	1,41
6	PTF	16,02	1,03
7	Forno	26,75	1,72
8	Feeders	69,36	4,47
9	Stencil	12,64	0,81
10	Engenharia	61,26	3,94
11	Otimização de programa	4,58	0,29
12	Documentação de processo	7,79	0,50
13	Outros (Técnico não disponível)	23,84	1,53
14	Troca de componentes	178,43	11,49
15	Change over	138,75	8,93
16	Reunião	48,25	3,11
17	Treinamento	0,00	0,00
18	MDO	11,98	0,77
19	Ineficiência	4,20	0,27
20	Outros	39,34	2,53
21	Ar condicionado	64,92	4,18
22	Falta ar comprimido	16,62	1,07
23	SCP	9,13	0,59
24	Impressora de etiquetas	9,68	0,62
25	Falta material interno	192,20	12,37
26	Falta material externo	79,08	5,09
27	Planejamento	27,08	1,74
28	Teste Funcional	1,78	0,11
29	Teste ICT	1,81	0,12
30	Material fora da especificação	3,95	0,25
31	Problemas técnicos	5,96	0,38
TOTAL		1553,26	100,00
PRODUTIVIDADE		57,53%	

Na BETA, o programador da produção e manutenção tem flexibilidade para

deslocar as atividades de MP de acordo com as necessidades da produção. Com o excesso de autonomia dada ao programador e a limitada atuação do setor de manutenção, as atividades preventivas ficaram em segundo plano, tornando-se comum não só o atraso, como também a não realização dos projetos de MP.

Outra deficiência apresentada no SMT é a inexistência de manutenções preditivas. Atualmente, a BETA não dispõe de equipamentos para medir e controlar parâmetros das máquinas deste setor. Como consequência dessa deficiência, pode-se destacar o desperdício de recursos com a substituição antecipada de uma peça, bem como a maior possibilidade de falhas nos equipamentos.

Com a expansão da empresa, no final de 2005, se fez necessário o aumento do número de equipes responsáveis pelas atividades da MP. Atualmente existem duas equipes de MP, que trabalham no terceiro turno, para atuar nas nove linhas do SMT. Entretanto, o aumento das linhas também aumentou a complexidade em designar um dia específico para que essas pudessem ser submetidas à MP. Isto se deve, principalmente, aos conflitos de interesses entre a manutenção e produção. Para o setor de produção, é importante atender com qualidade às demandas dos clientes, que apresentou um aumento considerável. Já o interesse da manutenção é agir previamente sobre os equipamentos de forma a eliminar a ocorrência de falhas devido ao desgaste.

Outra característica da MP na BETA é a inexistência de registros de defeitos dos equipamentos e respectivas ações tomadas. Uma das consequências deste problema é o alto índice de paradas dos equipamentos para manutenções corretivas, apesar das manutenções preventivas seguir as especificações do fornecedor.

No caso da empresa BETA, percebe-se que tanto a eficiência como o controle dos custos da manutenção estão comprometidos pela falta de critérios quantitativos durante a avaliação do período mais propício para a execução de cada projeto de MP.

Capítulo 4

Metodologia de Pesquisa

Neste capítulo é apresentada a estratégia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do modelo matemático que irá auxiliar o processo de tomada de decisão relacionada a programação da manutenção no sistema produtivo SMT. Serão também apresentados os conceitos e fases para a realização da metodologia de pesquisa.

4.1 Metodologia Estudo de Caso

Pelas características do presente trabalho, o método a ser utilizado é o estudo de caso. Esta técnica é utilizada quando se deseja um profundo estudo de um ou poucos objetos de maneira que se permita um amplo e detalhado conhecimento (GIL apud SILVA E MENEZES [40]).

O estudo de caso é uma descrição analítica de um evento ou de uma situação *in loco* com o objetivo de guiar o desenvolvimento de procedimentos para a obtenção de novas descobertas. Segundo Yin [56], a essência de um estudo de caso é que ele tenta esclarecer decisões, sempre avaliando o motivo pelo qual foram tomadas, como foram implementadas e com quais resultados.

Para definir a estratégia de pesquisa, existem três condições a serem observadas: *(i)* o tipo de pergunta da pesquisa; *(ii)* a extensão do controle que o pesquisador tem sobre os comportamentos dos eventos; *(iii)* o grau do foco na contemporaneidade

em oposição aos eventos históricos (TONDATO [48]).

Este trabalho apresenta como forma de questão de pesquisa o como e o porque. O tema é contemporâneo e ele não exige controle sobre os eventos comportamentais. Portanto, conforme demonstra a Tabela 4.1 o método de trabalho adequado é o estudo de caso.

Tabela 4.1: Situações Relevantes para Diferentes Estratégias de Pesquisa

Estratégia	Forma da questão da pesquisa	Exige controle sobre os eventos comportamentais?	Focaliza acontecimentos contemporâneos?
Levantamento	Quem, o que, onde, quantos, quanto	não	sim
Análise de Arquivos	Quem, o que, onde, quantos, quanto	não	sim / não
Pesquisa Histórica	Como, por que	não	não
Pesquisa-Ação	Quem, o que, onde, quantos, quanto	sim	sim
Estudo de Caso	Como, por que	não	sim

Fonte: COSMOS Corporation *apud* Yin [56]

Segundo Stuart *et al.* [41], o processo e pesquisa Estudo de Caso possui as seguintes fases:

1. Definição da pesquisa: o objetivo desta fase é contribuir para a construção ou validação de uma teoria baseada na observação de eventos numa organização ;
2. Desenvolvimento do instrumento de pesquisa: nesta fase são determinados os envolvidos no processo que afetam o objeto de estudo;
3. Coleta de dados: consiste em levantar dados do processo de forma observativa;
4. Análise dos dados: nesta fase, os dados são organizados de maneira que as questões que norteiam o objeto de pesquisa possam ser respondidas;
5. Divulgar resultados e conclusões da pesquisa: o objetivo desta etapa é validar a teoria estudada.

4.2 Protocolo de Pesquisa

As etapas que constituíram a estratégia utilizada para o desenvolvimento do modelo de planejamento da manutenção preventiva foram:

- Definição do problema: Como conseguir planejar as intervenções em linhas de produção SMT nos momentos mais oportunos?
- Levantamento dos fatores que impactam no planejamento da manutenção preventiva em linhas SMT através de reuniões com os técnicos e responsáveis pela manutenção. O objetivo primário destas reuniões era determinar os principais fatores que influenciam no processo e então, desenvolver uma ferramenta que auxiliasse tanto no planejamento quanto no controle das manutenções preventivas.
- Estudo do estado da arte: busca por trabalhos e publicações referentes ao tema manutenção preventiva, especificamente os que apresentam modelos matemáticos para auxílio a tomada de decisão.
- Avaliação do cenário e das atividades de manutenção das linhas SMT na empresa EMS.
- Customização de um *software* CMMS para apoiar as atividades de gerenciamento da manutenção.
- Coleta dos dados que impactam na programação da manutenção preventiva da empresa.
- Análise dos dados. Nesta etapa, os dados foram agrupados em uma estrutura que os relacionasse totalmente, para então desenvolver o modelo de programação.
- Desenvolvimento do modelo matemático cuja função principal é programar a escala das equipes de manutenção preventiva de forma otimizada.
- Testes computacionais e Validação do modelo. Nesta etapa, após os testes iniciais, a sensibilidade do modelo foi analisada e, para então o modelo ser validado.

- Apresentação dos resultados para os responsáveis pela manutenção nas linhas SMT e, então, implementação do modelo na rotina da empresa.

Neste trabalho, é assumido que o sistema de produção está sujeito à falhas aleatórias e que as ações de manutenção realizadas no sistema, em um determinado período, reduz a capacidade de produção do sistema neste período. Ou seja, apesar de não abordar o aspecto relacionado com a probabilidade da falha, o método de solução aqui proposto, além de considerar os custos diretos da manutenção, tem foco voltado para as perdas de produção inerentes às atividades de manutenção preventiva em linhas de produção SMT e busca uma técnica que seja capaz de dar suporte adequado ao planejamento de intervenções para os momentos realmente mais oportunos.

Capítulo 5

Descrição Conceitual do Problema

Conforme citado anteriormente, este trabalho pretende resolver o problema de otimização do plano de paradas de manutenção preventiva em linhas de produção SMT, considerando o contexto do segmento EMS.

Se assumir que as máquinas não terão problemas em um certo período, do ponto de vista econômico, a melhor opção em relação às intervenções da produção para a realização da manutenção era postergá-las o máximo possível. Isto porque a manutenção implica em custos diretos (mão-de-obra e materiais) e indiretos (perda de produção) para a empresa.

Este capítulo apresenta a descrição conceitual do problema de otimização da manutenção preventiva, o processo de evolução da modelagem, o modelo final e os testes computacionais.

5.1 O Problema

A questão central que pretende-se resolver é:

Como conseguir planejar as intervenções em linhas de produção SMT nos momentos mais oportunos?

Entende-se por "momento mais oportuno", o período cuja realização da manutenção seja menos dispendiosa.

Além do custo de realizar a manutenção, pode-se observar outros dois custos expressivos:

1. Custo pela perda de produção: entende-se como a receita que não é gerada na linha de produção, uma vez que esta fica inoperante devido a execução da MP;
2. Custo pela ineficiência do equipamento: entende-se como o efeito negativo sobre o equipamento ocasionado pelo atraso na execução da MP. Como consequência deste atraso, pode-se considerar a redução da eficiência do equipamento, bem como o aumento da possibilidade de defeitos ou quebras no mesmo.

5.2 Evolução do Modelo

O processo de desenvolvimento do modelo de manutenção apresentado neste trabalho foi gradativo. Basicamente, é possível sintetizá-lo em cinco etapas:

Etapa 1 - Reprodução do Modelo de Wagner *et al.* [52]

O modelo de alocação otimizada de mão-de-obra para manutenção preventiva proposto pelo autor foi o ponto de partida para o desenvolvimento do modelo apresentado neste trabalho. Inicialmente, para melhor entendimento do trabalho proposto por Wagner *et al.* [52], houve a necessidade de reproduzir os resultados apresentados no artigo, conforme apresentação no Apêndice A. Deste trabalho foram extraídas as idéias de alocação de projetos e suavização da capacidade de mão-de-obra do sistema no horizonte de programação.

Etapa 2 - Modificação da Restrição de Alocação

A restrição de alocação estava escrita, inicialmente, da seguinte forma:

$$\sum_{s \in S_p} X_{p,s} = 1 \quad \forall p \in P \quad (\text{equação 2.2})$$

Conforme mencionado no capítulo 2, a equação 2.2 garante que o projeto p será iniciado em uma semana s . Com o objetivo de adequá-la ao contexto deste trabalho, esta restrição passou a ser escrita da seguinte forma:

$$\sum_{t=1}^T x_{l,t}^p = \sum_{t=1}^T D_{l,t}^p \quad \forall p \in P, l \in L, t \in T$$

sendo L o conjunto de linhas de produção.

Desta forma, uma vez que os projetos inclusos neste trabalho devem ser realizados periodicamente, a equação acima garante que todos serão alocados no horizonte de programação considerado. Ou seja, o projeto p será alocado na linha de produção l , no período t conforme a demanda $D_{l,t}^p$.

Etapa 3 - **Atraso e Antecipação**

Até esta fase, utilizava-se o critério homens hora como unidade de medida da função objetivo. Porém, ao incluir a restrição que possibilita o atraso ou antecipação da manutenção, foi adotado o critério custo (em R\$) para facilitar a medida do efeito causado pelo deslocamento da realização da manutenção no horizonte de tempo. Nesta etapa, também foram incluídas as variáveis excesso e folga da força de trabalho. A primeira, mede a superutilização da mão-de-obra (hora extra). Já a segunda, mede o tempo ocioso da mão-de-obra.

Etapa 4 - **Contratação e Demissão**

Para fornecer mais flexibilidade ao modelo, foram adicionados custos para contratar e demitir, com o objetivo de adequar a capacidade de mão-de-obra às necessidades de cada período. Neste modelo, entende-se as denominações "contratação" e "demissão" como sendo ações de remanejamento (deslocamento) de funcionários entre setores diferentes de uma mesma empresa.

Etapa 5 - **Sinergia entre Projetos**

Nesta etapa, foi incluso no modelo um desconto (custo de sinergia) no custo

total caso seja ativada a variável sinergia entre o par de projetos. O objetivo de adicionar a variável "sinergia entre projetos" no modelo foi para favorecer a execução dos pares de projetos que geram economia de tempo e diminuir a possibilidade da realização conjunta dos pares de projetos que elevam o consumo de tempo.

Analisando cada fase do processo de evolução do modelo, pode-se perceber que o mesmo foi estruturado de forma que grande parte das decisões tomadas envolvessem *tradeoffs*, ou seja, a ponderação entre objetivos conflitantes. O comportamento do modelo diante destes conflitos está ilustrado na Figura 5.1.

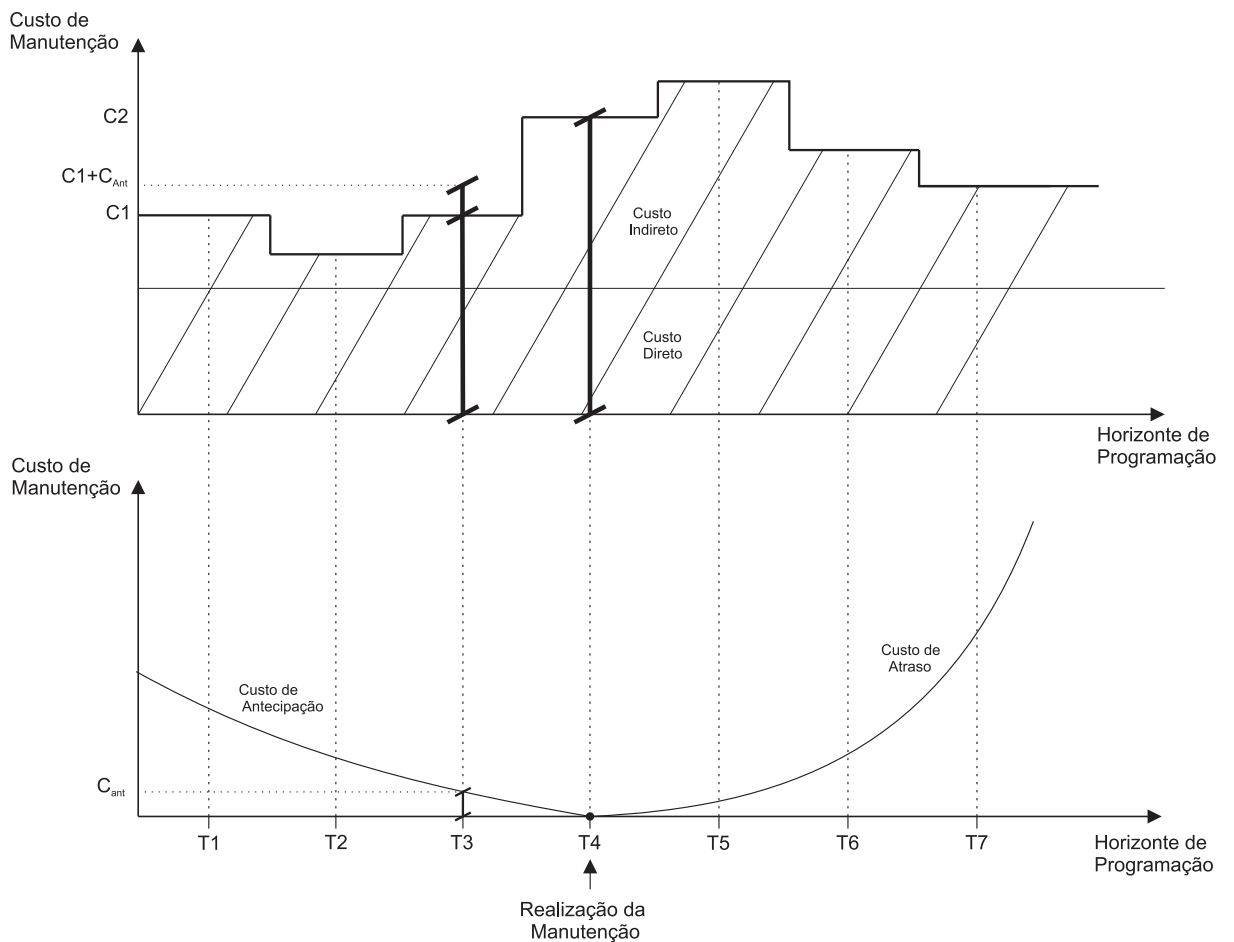


Figura 5.1: Representação do Modelo Proposto

Conforme mencionado anteriormente, a composição do custo de manutenção de equipamentos de uma determinada linha de produção inclui fatores diretos e indiretos. O primeiro refere-se aos gastos diretos com a manutenção, por exemplo, custo de mão-de-obra, materiais, etc. Já o segundo apresenta o custo de manter a linha inoperante em cada período de tempo. Essa parcela de custo varia de acordo com a demanda prevista de produção no horizonte analisado. O segundo gráfico da Figura 5.1 apresenta o comportamento da função custo em relação ao deslocamento da data de realização da manutenção.

Observa-se que na data programada (semana $T4$), os custos de antecipação ou de atraso são iguais a zero. Porém, uma vez que o custo total de realizar a manutenção é composto pelas parcelas apresentadas nos dois gráficos, a semana $T4$ apresenta custo total igual à $C2$. Diante do exemplo analisado, verifica-se que algumas vezes é mais interessante antecipar ou atrasar a data de realização de um dado projeto para que este possa ser executado em um período que apresente menor custo, uma vez que o objetivo principal é minimizar os custos inerentes à manutenção.

5.3 Modelo Proposto

Para a definição matemática do problema, faz-se necessário descrever os conjuntos utilizados:

Lista de Conjuntos

L = conjunto de linhas em que as manutenções são realizadas

P = conjunto de projetos de manutenção preventiva

T = conjunto de semanas do horizonte de programação

Parâmetros

Os parâmetros que balizam a solução a ser encontrada pelo modelo são:

- $C_{l,t}$: custo de realização da manutenção preventiva na linha de produção l e período t . O custo de acionar a manutenção em uma linha, fica sujeito aos custos diretos das ações de prevenção, inspeção e revisão dos equipamentos da linha de

produção, bem como à receita não gerada pela linha no período determinado, sendo a receita dependente do custo do produto e da cadência³ de produção.

- $CAtr_{l,t}$: custo gerado pelo atraso na realização das tarefas de manutenção na linha l e no período t . Este custo mede o impacto gerado pelo atraso na manutenção. Normalmente, os principais problemas ocorridos são: diminuição no desempenho dos equipamentos, aumento do índice de ações corretivas e aumento do tempo de ciclo da produção.
- $CAnt_{l,t}$: custo gerado pela antecipação da manutenção na linha l e no período t . O custo de antecipar a manutenção é dependente do índice de vendas perdidas em um determinado período, devido ao estado inoperante da linha.
- $G_{(0)}$: define a capacidade do recurso mão-de-obra disponível, no período inicial, para a realização da manutenção preventiva.
- CF_t : custo devido à subutilização da mão-de-obra disponível para a realização da manutenção no período t .
- CE_t : custo devido à superutilização da mão-de-obra disponível para a realização da manutenção no período t .
- TE_i^p : tempo consumido na realização do projeto de manutenção p na linha l .
- $D_{l,t}^p$: data programada t para a realização do projeto de manutenção preventiva p , na linha l . Esta demanda ou frequência de execução da manutenção foi definida a partir do estudo do manual do fornecedor.
- CHi_t : despesa relativa à contratação de mão-de-obra no período t para as atividades de manutenção.

³Cadência de Produção: mede a taxa horária de produção de um determinado produto. Na linha SMT representa o número de placas de circuito impresso que cada linha é capaz de produzir ao longo de uma hora de produção.

- CFi_t : despesa relativa à demissão de mão-de-obra da manutenção no período t .
- $CS_l^{p,q}$: desconto/ági o devido à sinergia/anti- sinergia entre os projetos p e q .
Ocorre sinergia entre dois projetos quando o total de homens hora necessário para a realização conjunta destes projetos é menor que a soma de homens hora de cada projeto realizado separadamente.
- $S^{p,q}$: matriz de sinergia/anti-sinergia entre os projetos de manutenção p e q .
- E : porcentagem da capacidade instalada ($G_{(0)}$) que determina a taxa máxima de utilização da mão-de-obra para realização das atividades de manutenção.
- F : porcentagem da capacidade instalada ($G_{(0)}$) que determina a taxa mínima de utilização da mão-de-obra para realização das atividades de manutenção.

Variáveis

- $x_{l,t}^p = \begin{cases} 1, & \text{se o projeto } p \text{ for realizado na linha } l \text{ no instante de tempo } t; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $s_{l,t}^{p,q} = \begin{cases} 1, & \text{se existe sinergia entre os projetos } p \text{ e } q, \text{ na linha } l \text{ e no período } t; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- g_t : capacidade de mão de-obra requerida para a realização das atividades de manutenção no período t .
- e_t : quantidade de horas extra utilizadas durante a execução das atividades de manutenção preventiva no período de tempo t .
- f_t : folga devido à subutilização da mão-de-obra no período de tempo t .
- $atr_{l,t}^p$: atraso do projeto p da linha l no instante de tempo t .

- $ant_{l,t}^p$: antecipação do projeto p da linha l no instante de tempo t .
- hi_t : acréscimo de homens hora devido a contratação de funcionário.
- fi_t : decréscimo de homens hora devido a demissão de funcionário.

Modelo

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T C_{l,t} x_{l,t}^p + \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T CAtr_{l,t} atr_{l,t}^p + \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T CAnt_{l,t} ant_{l,t}^p + \\ & \sum_{t=1}^T (CHi_t hi_t + CFi_t fi_t) + \sum_{t=1}^T (CE_t e_t + CF_t f_t) + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T CS_{l,t}^{p,q} s_{l,t}^{p,q} \end{aligned}$$

$$\text{sujeito a:} \quad \sum_{t=1}^T x_{l,t}^p \leq \sum_{t=1}^T D_{l,t}^p \quad \forall p = 1, 2, \dots, P \quad (5.1)$$

$$\forall l = 1, 2, \dots, L$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L TE_l^p x_{l,t}^p = g_t + e_t + f_t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (5.2)$$

$$e_t \leq E g_t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (5.3)$$

$$f_t \leq F g_t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (5.4)$$

$$g_t = g_{t-1} + hi_t - fi_t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (5.5)$$

$$g_1 = G_{(0)} + hi_1 - fi_1 \quad (5.6)$$

$$atr_{l,t}^p - ant_{l,t}^p = \sum_{h \leq t} (D_{l,h}^p - x_{l,h}^p) \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (5.7)$$

$$\forall l = 1, 2, \dots, L$$

$$\forall p = 1, 2, \dots, P$$

$$\forall h \in T, \text{ sendo } h \leq t$$

$$s_{l,t}^{p,q} \geq x_{l,t}^p + x_{l,t}^q - 1 \quad \forall (p, q) \in S^{p,q} \quad (5.8)$$

$$s_{l,t}^{p,q} \leq x_{l,t}^p \quad \forall (p, q) \in S^{p,q} \quad (5.9)$$

$$s_{l,t}^{p,q} \leq x_{l,t}^q \quad \forall (p, q) \in S^{p,q} \quad (5.10)$$

Restrições

- Aloca Projetos : a restrição 5.1 aloca uma quantidade de projetos menor ou igual à soma da demanda de manutenção ao longo de todo o período de programação. O modelo aceita que um determinado número de projetos não seja realizado no período de programação considerado, isto se esta opção for interessante financeiramente.
- Capacidade : a restrição 5.2 mede o excesso ou folga de mão-de-obra. Sendo o primeiro referente à superutilização do funcionário (hora extra) e, o segundo, à subutilização do mesmo (ociosidade no trabalho).
- Excesso Max : a restrição 5.3 limita a variável "excesso de mão-de-obra", sendo permitido superutilizar o funcionário somente até o limite calculado.
- Folga Max : a restrição 5.4 limita a variável "folga de mão-de-obra", determinando o máximo tempo de ociosidade permitido ao funcionário.
- Hire / Fire : a restrição 5.5 fornece flexibilidade ao modelo, permitindo alocar ou desalocar mão-de-obra de acordo com a capacidade exigida para execução dos projetos demandados no período em questão. A variável g_t é determinada de forma a minimizar a variação da capacidade ao longo do período de programação.
- Âncora : a restrição 5.6 determina a capacidade de mão-de-obra para o período 1, considerando a capacidade inicial do sistema ($G_{(0)}$) e o excesso e a folga calculados para no mesmo período.
- Atraso / Antecipação : a restrição 5.7 calcula os atrasos e antecipações dos projetos. Estes são determinados através da diferença aritmética entre a demanda de projetos programados para a data t ($D_{l,t}^p$) e a alocação real para esta data ($x_{l,t}^p$).
- Sinergia 1 : garante a ativação da sinergia entre os projetos p e q , se os mesmos forem alocados conjuntamente, além da matriz de sinergia indicar que ocorre sinergia para esse par de projetos.

- Sinergia 2 : garante que a variável binária $s_{l,t}^{p,q}$ assumo o valor **0** se o projeto p não for ativado.
- Sinergia 3 : garante que a variável binária $s_{l,t}^{p,q}$ assumo o valor **0** se o projeto q não for ativado.

5.4 Testes Computacionais

O modelo proposto foi desenvolvido na linguagem *MathProg*, utilizando o pacote gratuito GLPK (*GNU Linear Programming Kit*) e testado em uma máquina ATHLON® Dual Core 3800+, 2 GHz com 1 GB de memória RAM no *prompt* de comando da plataforma Windows XP Pro.

Os problemas-teste adotados para a validação do modelo foram divididos em 3 grupos, de acordo com o grau de complexidade envolvido:

Grupo 1 - constituído por 3 projetos de manutenção com demanda específica, considerando um sistema com 2 linhas de produção e um horizonte de programação de 3 períodos. As instâncias deste grupo são apresentadas como Txx-3_2_03, sendo "xx" o índice da instância.

Grupo 2 - constituído por 3 projetos de manutenção com demanda específica, 4 linhas de produção e 5 períodos de programação. As instâncias deste grupo são apresentadas como Txx-3_4_05.

Grupo 3 - constituído por 3 projetos de manutenção com demanda específica, 9 linhas de produção e 6 períodos de programação. As instâncias deste grupo são apresentadas como Txx-3_9_06.

5.4.1 Análise dos resultados

Durante as fases de testes e validação do modelo, foram avaliadas as alterações ocorridas na solução do problema devido aos diferentes cenários construídos através da modificação de parâmetros.

O processo de construção destes cenários ocorreu através do aumento crescente da complexidade computacional nos grupos de instâncias, de forma a avaliar o comportamento do modelo em cada condição proposta.

5.4.1.1 Grupo 1

O grupo 1 é constituído de dez instâncias pequenas, formadas com 3 projetos, 2 linhas de produção e 3 períodos no horizonte de programação.

Tabela 5.1: Resultados das Instâncias do Grupo 1

Instância	RESULTADOS							
	Excesso Total de HH	Folga Total de HH	Nº de Contratações	No de Demissões	Nº de Ativações do atraso	Nº de Ativações da antecipação	Nº de Ativação de sinergia	Nº de Demandas ã programadas
T01-3_2_03	0	0	0	20	2	0	2	0
T02-3_2_03	0	0	20	0	7	0	1	3
T03-3_2_03	0	0	5	20	2	0	2	1
T04-3_2_03	0	5	0	15	2	0	2	1
T05-3_2_03	0	0	0	100	8	0	0	5
T06-3_2_03	0	20	0	45	18	18	1	0
T07-3_2_03	0	0	0	55	1	0	1	0
T08-3_2_03	0	0	5	10	3	0	0	1
T09-3_2_03	0	10	5	45	2	0	2	0
T10-3_2_03	0	0	15	5	2	0	2	0

Instância	ALTERAÇÕES	Custo Total	Tempo Computac. médio (s)
T01-3_2_03	Instância Inicial	7720	<1
T02-3_2_03	↓ Capacidade	7350	<1
T03-3_2_03	↑ Demanda = capacidade inicial	8310	<1
T04-3_2_03	↓ C.Excesso e ↓ C.Folga	8160	<1
T05-3_2_03	↑ C.Manutenção = demanda e capacidade inicial	12850	<1
T06-3_2_03	↓ C.Antecipação = c.manutenção inicial	510	<1
T07-3_2_03	↑ C.Atraso = c.antecipação inicial	8110	<1
T08-3_2_03	↑ T.Execução = c.atraso inicial	5800	<1
T09-3_2_03	↑ Sinergia e ↑ Desconto = c.atraso inicial	7860	<1
T10-3_2_03	↓ Capacidade ↓ CFI ↓ CHI	5260	<1

Todas as instâncias deste grupo foram resolvidas em tempo computacional menor que 1 segundo, como pode ser observado na Tabela 5.1. A evolução na análise dos resultados deste grupo de instâncias segue as etapas:

1. A primeira instância foi formada sem discrepância nos parâmetros do modelo. O

objetivo era ter uma referência para a análise dos vários cenários construídos nas demais instâncias.

2. Na segunda instância, a capacidade de mão-de-obra foi reduzida, mantendo-se constantes os demais parâmetros. A solução apontada pelo modelo foi a contratação de mão-de-obra para suprir a necessidade do sistema, além de atrasar alguns projetos para períodos com maior ociosidade de força de trabalho.
3. No terceiro teste, foi restaurada a capacidade inicial do grupo de teste e aumentada a demanda de manutenções. Foi observado que nos períodos que apresentavam baixa demanda, a força de trabalho foi reduzida através de demissões. Porém, em alguns períodos de sobrecarga de trabalho, houve a necessidade de repor uma parte da força de trabalho.
4. Na quarta instância, ainda com a mesma demanda de manutenção, foram reduzidos os custos de excesso e de folga da mão-de-obra. O objetivo deste teste era verificar se a redução dos custos de sobrecarga e subutilização da mão-de-obra reduziria o índice de contratação ou demissão. A solução do modelo mostra que ainda foi interessante demitir parte da mão-de-obra, sendo esta menor que no teste anterior. Isto ocorreu porque em alguns períodos do horizonte de programação havia ociosidade no trabalho, porém, para não contratar nos períodos de sobrecarga foi interessante manter uma parte da mão-de-obra ociosa.
5. Para o quinto teste, foram restauradas a demanda e a capacidade de mão-de-obra e aumentado o custo de realização da manutenção. Foi observado que quando o custo de atraso é relativamente baixo em relação ao da manutenção propriamente dita, é interessante postergar alguns projetos até o final do período de programação. A possibilidade de não programar uma determinada manutenção no horizonte de tempo considerado foi adicionada ao modelo para aumentar a flexibilidade do sistema e, com isto, buscar sempre a solução de mínimo custo da manutenção.
6. Os testes 6 e 7 foram realizados para mostrar que reduzindo os custos de antecipação ou atraso, o sistema opta por antecipar ou atrasar as manutenções ao invés de

contratar e demitir. De forma análoga, quando estes custos são elevados, o sistema tende a realizar as manutenções nas datas programadas.

7. Na instância 8 foi verificado o comportamento do modelo quando o tempo de execução dos projetos são aumentados. Pode-se observar que o sistema tende a equilibrar sua força de trabalho para atender os projetos de manutenção.
8. O teste 9 buscou verificar a resposta do modelo em relação as sinergias entre projetos. Desta forma, foram estabelecidos descontos para os projetos cuja realização conjunta era interessante e, acréscimos para os pares de projetos que apresentava anti-sinergia. A resposta para esta questão foi contratar mão-de-obra em um determinado período para "aproveitar" o desconto dado para a realização conjunta deste par de projetos.
9. No último teste deste grupo, a capacidade de mão-de-obra foi consideravelmente reduzida e, por outro lado, foi favorecido a possibilidade de contratação e demissão da força de trabalho. Neste caso, o sistema optou por demitir e contratar em períodos diferentes do horizonte de programação ao invés de pagar por excesso ou folga de mão-de-obra.

5.4.1.2 Grupo 2

O segundo grupo de teste consiste de 3 projetos de MP para serem programados em 4 linhas de produção SMT no horizonte de tempo de 5 semanas.

A Tabela 5.2 apresenta as características das soluções geradas para o grupo de teste 2. Uma vez que as instâncias deste grupo eram maiores, esperava-se que o tempo computacional para resolvê-las também fosse maior, o que foi confirmado.

As análises de sensibilidade realizadas neste grupo tiveram como principal objetivo a verificação da coerência entre as direções apontadas pelas alterações realizadas em parâmetros do problema e as soluções efetivamente encontradas pelo modelo.

Tabela 5.2: Resultados das Instâncias do Grupo 2

Instância	RESULTADOS							
	Excesso Total de HH	Folga Total de HH	Nº de Contratações	Nº de Demissões	Nº de Ativações do atraso	Nº de Ativações da antecipação	Nº de Ativação de sinergia	Nº de Demandas ã programadas
T11-3_4_05	0	20	0	135	13	5	6	2
T12-3_4_05	0	5	0	5	15	7	5	2
T13-3_4_05	0	20	0	135	13	5	6	2
T14-3_4_05	0	10	0	5	12	5	6	1
T15-3_4_05	5	0	10	0	29	1	2	9
T16-3_4_05	10	0	80	0	14	8	7	2
T17-3_4_05	0	0	85	0	12	9	6	2
T18-3_4_05	10	5	80	0	18	7	11	3
T19-3_4_05	25	0	10	0	28	3	6	8
T20-3_4_05	30	0	135	0	9	5	17	2

Instância	ALTERAÇÕES	Custo Total	Tempo Computac.
			médio (s)
T11-3_4_05	Instância Inicial	14480	<1
T12-3_4_05	↑ T.Execução	6825	38,20
T13-3_4_05	↑ E(%) e ↑ F(%) = t.execução inicial	14480	<1
T14-3_4_05	↓ C.Manutenção e ↓ Capacidade	3640	<1
T15-3_4_05	↓ Capacidade (maior redução)	6925	<1
T16-3_4_05	↑ C.Sinergia	4185	4,40
T17-3_4_05	Teste Anti-sinergia	4580	3,80
T18-3_4_05	↑ Sinergia	3410	4,60
T19-3_4_05	↑ CHi ↑ CFi	5470	30,90
T20-3_4_05	↑ Demanda	2205	1,40

5.4.1.3 Grupo 3

O grupo 3 é constituído por 3 projetos de MP para serem programados em 9 linhas de produção no horizonte de tempo de 6 semanas.

Os dados iniciais deste grupo referem-se aos parâmetros coletados na empresa em que o estudo de caso foi realizado. Os resultados e conclusões deste grupo são apresentados no capítulo 6.

Capítulo 6

Apresentação e Análise dos Resultados

Diante da situação descrita, foi desenvolvida uma metodologia capaz de formular uma proposta de programação da manutenção consistente, considerando os diferentes aspectos envolvidos no problema, de forma a balancear vantagens e desvantagens das várias alternativas possíveis.

6.1 Melhorias no Sistema de Manutenção

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, que é apresentar uma ferramenta capaz de planejar as intervenções nas linhas de produção SMT nos momentos mais oportunos, fez-se necessário realizar algumas melhorias no atual sistema de manutenção da empresa BETA.

Estas ações de melhorias são justificadas por deficiências no gerenciamento da manutenção dos equipamentos da BETA que resultam na redução do desempenho dos equipamentos do SMT.

Portanto, para atender às necessidades funcionais do sistema de manutenção, tais como: controle de inventários de materiais, solicitação de trabalho, histórico de intervenções entre outros, fez-se necessário a customização de CMMS.

Após a estruturação do sistema, foi desenvolvida uma metodologia para assegurar a qualidade e a confiabilidade das tarefas de MP realizadas.

Esta auditoria da qualidade, como foi proposta na empresa BETA, teve intenção de conscientizar e envolver os funcionários do SMT na busca pela redução das perdas no processo produtivo. Para o correto funcionamento deste processo, cada envolvido passou a assumir as respectivas responsabilidades.

6.1.1 Auditoria

A metodologia proposta envolve a participação dos operadores de linha e manutenção, técnicos e líderes de produção SMT. As responsabilidades de cada participante para o funcionamento adequado das atividades de manutenção preventiva são apresentadas nas Figuras 6.1 e 6.2.

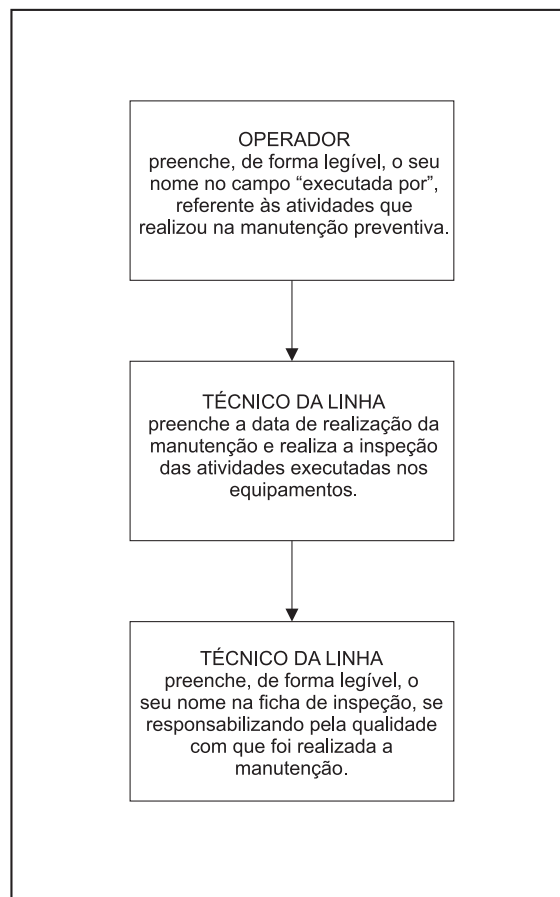


Figura 6.1: Procedimento para Inspeção da Manutenção Preventiva

De acordo com a Figura 6.1, os **operadores**, após a realização das atividades de manutenção, deverão assinar o plano de manutenção, deixando registrado no doc-

umento a data e a identificação do responsável pela execução de cada atividade. Em seguida, as atividades realizadas pelos operadores serão vistoriadas pelo **técnico da equipe** de MP e validadas pelo **líder de produção**. A validação da MP, como pode ser observado na Figura 6.2, será através da avaliação da qualidade do primeiro lote de cinquenta placas produzidas na linha logo após à manutenção.

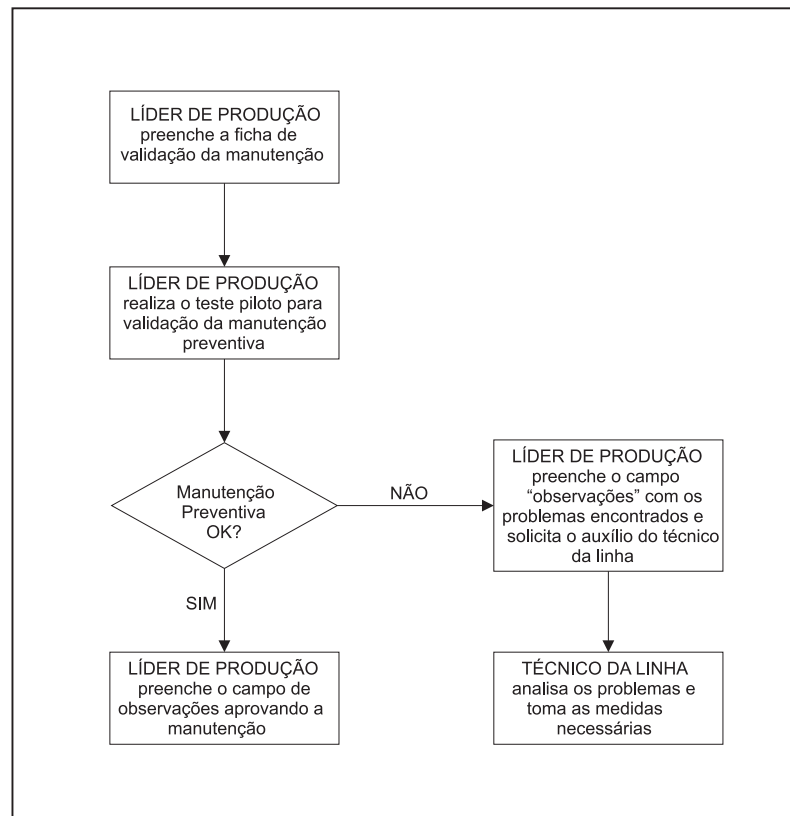


Figura 6.2: Procedimento para Validação da Manutenção Preventiva

6.1.2 Sistema de Informação

Para melhorar o controle das atividades de manutenção, foi implantado um *software* que auxiliasse os responsáveis na análise dos defeitos ocorridos nos equipamentos e custos envolvidos no processo, bem como, no acompanhamento das atividades de manutenção pendentes.

6.2 Apresentação dos Dados

Visando adequar o grau de complexidade do problema ao estritamente necessário para o desenvolvimento do trabalho, foram considerados apenas os projetos de manutenção que apresentam maior impacto na programação da manutenção. Para a seleção dos projetos de manutenção foram adotados os seguintes critérios:

- a. Projetos que apresentam maior grau de dificuldade na programação. Ou seja, não serão adotados projetos cuja programação seja trivial, como por exemplo a manutenção diária;
- b. Projetos cuja periodicidade proporcionem melhor análise de custos de atraso e antecipação em relação à janela de tempo adotada;
- c. Projetos cujo intervalo de realização seja menor ou igual ao horizonte de programação adotado neste trabalho.

Assim, para o desenvolvimento do trabalho, foram escolhidos três projetos de manutenção: quinzenal, mensal, trimestral.

6.2.1 Considerações iniciais

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram adotados três projetos de manutenção preventiva e nove linhas de produção SMT, que estão representados na Tabela 6.1.

Foi adotado o intervalo de tempo entre cada período do horizonte de programação igual a uma semana. A Tabela 6.2 apresenta a periodicidade de execução dos projetos de manutenção. Para ajustar a janela de tempo mínima à frequência de execução de cada projeto, foi adotada a conversão das unidades para semanas.

O horizonte de programação considerado neste trabalho é de 06 períodos, com início no período 1 e término no período 6. Os dados de entrada do modelo seguem o sistema de unidades de medida apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.1: Conjuntos do Modelo

Linhas de Produção		Projetos de Manutenção	
Linha 1	Andrômeda	Projeto 1	Quinzenal
Linha 2	Apolo	Projeto 2	Mensal
Linha 3	Athenas	Projeto 3	Trimestral
Linha 4	Dragon		
Linha 5	Pégasus		
Linha 6	Phoenix		
Linha 7	Quimera		
Linha 8	Scorpions		
Linha 9	Titan		

Tabela 6.2: Intervalo de tempo de cada projeto de manutenção

Projeto	Intervalo
Quinzenal	2 semanas
Mensal	4 semanas
Trimestral	13 semanas

Tabela 6.3: Unidades dos Dados do Modelo

Unidade de medida		Descrição
<i>R\$</i>	Reais	Valor expresso na unidade monetária Real
<i>HH</i>	Homens Hora	Soma das horas consumidas pelo total de homens que executaram determinado serviço
<i>sem</i>	Semanas ou <i>Slot</i>	Janela de tempo do horizonte de programação
<i>h</i>	Hora	Tempo de duração de determinada atividade

6.2.2 Custo de realização da manutenção preventiva

O custo de acionar a mão-de-obra, apresentado na Tabela 6.4 é composto por custos diretos e indiretos às atividades de manutenção. Basicamente, o custo direto pode ser determinado pelo gasto com a mão-de-obra envolvida, bem como materiais necessários às atividades de manutenção. O principal custo indireto da MP é o da linha parada, que também pode ser visto como a receita não gerada da linha de produção em cada período de tempo t . Este custo é dependente tanto do produto que seria processado na linha, quanto da cadência de produção do mesmo.

Tabela 6.4: Custo da Manutenção (custo em R\$)

Linha	Custo de Manutenção					
	$C_{i,1}$	$C_{i,2}$	$C_{i,3}$	$C_{i,4}$	$C_{i,5}$	$C_{i,6}$
1 Andrômeda	2001,36	4997,66	5492,24	5191,82	4150,20	1792,77
2 Apolo	2471,44	1646,73	2801,98	841,15	682,81	692,05
3 Athenas	1249,22	488,01	592,28	393,67	485,33	498,32
4 Dragon	2257,67	1790,01	878,80	2307,67	758,20	538,78
5 Pegasus	2827,87	2754,70	1406,86	1662,94	1826,42	949,57
6 Phoenix	1943,67	1288,57	881,19	653,84	1130,88	868,05
7 Quimera	2453,44	6099,30	8887,32	8201,39	4064,57	2194,67
8 Scorpions	2081,67	1275,65	1187,60	815,41	1992,82	845,83
9 Titan	3699,44	4003,33	1411,82	1926,09	1286,88	835,48

6.2.3 Custo de atraso

Dentre os impactos gerados pelo atraso do início das tarefas de MP, de acordo com a data programada no plano de manutenção, os principais são:

- (i) redução da eficiência dos equipamentos;
- (ii) aumento do índice de quebras, falhas e defeitos nos equipamentos; redução da qualidade dos produtos processados; redução da cadência produtiva.

Tabela 6.5: Custo de Atraso da Manutenção (custo em R\$)

Linha	Custo de Atraso					
	$CAtr_{i,1}$	$CAtr_{i,2}$	$CAtr_{i,3}$	$CAtr_{i,4}$	$CAtr_{i,5}$	$CAtr_{i,6}$
1 Andrômeda	2425,56	5421,86	5916,44	5616,02	4574,40	2216,97
2 Apolo	2865,44	2040,73	3195,98	1235,15	1076,81	1086,05
3 Athenas	1618,22	857,01	961,28	762,67	854,33	867,32
4 Dragon	2964,98	2497,32	1586,11	3014,98	1465,51	1246,09
5 Pegasus	3172,94	3099,77	1751,93	2008,01	2171,49	1294,64
6 Phoenix	2777,63	2122,53	1715,15	1487,80	1964,84	1702,01
7 Quimera	2838,54	6484,40	9272,42	8586,49	4449,67	2579,77
8 Scorpions	2426,74	1620,72	1532,67	1160,48	2337,89	1190,90
9 Titan	4080,05	4383,94	1792,43	2306,70	1667,49	1216,09

O custo de atraso foi determinado, na empresa BETA, através de estimativas técnicas ⁵ do desempenho do sistema. A Tabela 6.5 apresenta o custo devido aos efeitos do atraso de um período t na realização do projeto de manutenção p .

6.2.4 Custo de antecipação

O custo por antecipar a realização de um projeto de manutenção é diretamente dependente da demanda de produção para a linha l no período t . Neste trabalho, o custo de antecipação das atividades de manutenção, apresentado na Tabela 6.6, foram obtidos através da receita esperada pela demanda de produtos em cada período do horizonte de programação.

Se a demanda por uma determinada placa, sendo esta montada na linha de produção Pégasus, por exemplo, for relativamente baixa na semana 3 do horizonte de programação e, a equipe de manutenção estiver disponível para antecipar as atividades de prevenção da linha para esta semana, o custo de antecipação da manutenção será negativo, ou seja, é interessante aproveitar a oportunidade de baixa demanda para a intervenção na linha. De forma análoga, este custo será alto, quando a demanda de produtos da linha l no período t for relativamente superior que a média.

Tabela 6.6: Custo Antecipação (custo em R\$)

Linha	Custo de Antecipação					
	$CAnt_{i,1}$	$CAnt_{i,2}$	$CAnt_{i,3}$	$CAnt_{i,4}$	$CAnt_{i,5}$	$CAnt_{i,6}$
1 Andrômeda	1974,36	4970,66	5465,24	5164,82	4123,20	1765,77
2 Apolo	2444,44	1619,73	2774,98	814,15	655,81	665,05
3 Athenas	1222,22	461,01	565,28	366,67	458,33	471,32
4 Dragon	2230,67	1763,01	851,80	2280,67	731,20	511,78
5 Pegasus	2800,87	2727,70	1379,86	1635,94	1799,42	922,57
6 Phoenix	1916,67	1261,57	854,19	626,84	1103,88	841,05
7 Quimera	2426,44	6072,30	8860,32	8174,39	4037,57	2167,67
8 Scorpions	2054,67	1248,65	1160,60	788,41	1965,82	818,83
9 Titan	3672,44	3976,33	1384,82	1899,09	1259,88	808,48

⁵Durante o desenvolvimento do trabalho, houve a participação de especialistas da própria empresa BETA, que estimaram o efeito do atraso na realização da manutenção em cada linha de produção SMT e em todos períodos do horizonte de programação.

Como os produtos da empresa BETA são caracterizados por um alto valor agregado, necessidade de entregas rápidas além da volatilidade da demanda, espera-se que a programação da produção seja densa nos períodos iniciais e esparsa nos períodos finais do horizonte de programação. Isto implica, normalmente, em elevados custos de antecipação da manutenção nos períodos iniciais que, tendem a reduzir ao longo da programação.

6.2.5 Capacidade da força de trabalho

Adaptado do modelo apresentado por Wagner [52], a capacidade de força de trabalho é igual ao número total de homens hora (HH) disponíveis para a execução das tarefas de manutenção no período t .

Neste trabalho, a capacidade de mão-de-obra, apresentada na Tabela 6.7, é determinada pelo número total de homens hora instalada no sistema, ou seja, a capacidade da força de trabalho disponível.

Tabela 6.7: Capacidade de Mão-de-obra Instalada no Sistema (HH)

Capacidade	250
------------	-----

6.2.6 Custo de folga e excesso

O custo de folga representa a despesa referente ao pagamento de um serviço que não gera retorno para a empresa. Ou seja, a empresa contrata um certo número de homens hora por mês (capacidade de trabalho) mas subutiliza este recurso. Na empresa BETA, este custo é igual ao valor da hora de trabalho (salário e encargos por hora de trabalho) do funcionário, como mostra a Tabela 6.8.

O custo de excesso representa a despesa referente ao pagamento das horas de trabalho que ultrapassaram às contratadas. Ou seja, devido a superutilização da mão-de-obra, a empresa paga por cada hora extra um valor igual ao da hora normal de trabalho acrescido do adicional extraordinário.

Tabela 6.8: Custo de Folga e Excesso de Mão-de-obra (custo em R\$)

Custo de Excesso	14,40
Custo de Folga	9,00

Embora a taxa de utilização do funcionário possa variar ao longo do horizonte de programação, neste trabalho é considerada que a mesma se mantém constante em todos os períodos de programação.

6.2.7 Tempo de execução dos projetos de manutenção

O tempo consumido durante a realização das tarefas de manutenção é dependente do projeto de manutenção e da linha de produção. A Tabela 6.9 apresenta o tempo para executar as tarefas do projeto p na linha l . Portanto, a duração do projeto p é igual ao tempo necessário para um funcionário realizar as atividades deste projeto na linha l .

Tabela 6.9: Duração de cada Projeto (tempo em h)

Linhas	Projetos de Manutenção		
	Quinzenal	Mensal	Trimestral
Andrômeda	25,42	94,17	40,00
Apolo	20,42	67,92	37,50
Athenas	20,42	88,75	43,75
Dragon	14,58	57,08	22,08
Pégasus	16,25	76,25	37,50
Phoenix	14,58	57,08	22,08
Quimera	20,40	67,92	37,50
Scorpions	24,17	82,92	52,92
Titan	8,75	87,92	19,17

Cada linha de produção SMT é composta basicamente por três tipos de equipamentos (printer, inseridora e forno), porém a composição das linhas SMT da empresa BETA varia conforme o produto montado na linha, como pode ser observado no Apêndice B.1. Por exemplo, para montagem de placa-mãe, a linha geralmente é com-

posta por um número maior de insersoras, isto porque esta PCB contém grande variedade de componentes. Além disso, os equipamentos de mesma função podem ser de diferentes fabricantes, o que altera o conjunto de tarefas de um projeto de manutenção.

6.2.8 Custo de contratar e demitir

O custo de contratar é determinado pela despesa gasta pela empresa referente a contratação de mais um funcionário para a equipe de manutenção preventiva.

De forma análoga, o custo de demitir representa o valor gasto no acerto de contas do funcionário, quando este é desligado da equipe.

Estes custos foram inseridos no modelo com o objetivo de fornecer flexibilidade em relação a capacidade de mão-de-obra. Ou seja, é possível aumentar ou diminuir a quantidade de homens hora disponível em cada período de tempo, adicionando ao custo de manutenção o custo de contratar ou demitir.

A Tabela 6.10 apresenta o custo de contratação e de demissão de um funcionário da equipe de manutenção na empresa BETA. Embora estes custos possam variar ao longo do horizonte de tempo, neste trabalho eles são considerados constante.

Tabela 6.10: Custo de Contratar e Demitir (custo em R\$)

Custo de Contratar	792,00
Custo de Demitir	4.752,00

6.2.9 Matriz de sinergia

Se a realização conjunta do par de projetos p e q alocar menor quantidade de homens hora que a realização separada dos mesmos, ocorre sinergia entre este par de projetos. Por outro lado, pode ocorrer anti-sinergia entre projetos quando a realização isolada destes for menos vantajosa que a conjunta.

Na Tabela 6.11 podem ser visualizados os pares de projetos que apresentam

sinergia/anti-sinergia.

Tabela 6.11: Matriz de Sinergia/Anti-sinergia entre Projetos

	Quinzenal	Mensal	Trimestral
Quinzenal	0	1	0
Mensal	1	0	1
Trimestral	0	1	0

O elemento **1** (um) da tabela significa que há sinergia/anti-sinergia entre os projetos. Já o elemento **0** (zero) indica que a mesma não ocorre.

6.2.10 Custo de sinergia

O custo de sinergia é determinado pela economia de homens hora gerada durante execução dos projetos p e q concomitantemente. Da mesma forma, o custo de anti-sinergia é determinado pelo acréscimo de homens hora durante a execução dos projeto p e q .

O objetivo deste custo é favorecer a execução dos pares de projetos que geram economia de tempo e diminuir a possibilidade de realização conjunta dos pares de projetos que elevam o consumo de tempo.

A Tabela 6.12 apresenta o desconto devido à sinergia entre projetos. O custo positivo significa acréscimo no custo final, ocasionado pelo aumento do tempo da manutenção de pares de projetos que apresentam anti-sinergia. Pela mesma linha de raciocínio, o custo negativo pode ser interpretado como redução do custo final devido a realização conjunta de projetos que apresentam sinergia.

Tabela 6.12: Custo de Sinergia/Anti-sinergia entre Projetos (custo em R\$)

	Quinzenal	Mensal	Trimestral
Quinzenal	-	-1.883,55	-
Mensal	-1.883,55	-	-941,78 8
Trimestral	-	-941,78	-

A sinergia além de diminuir o custo direto da manutenção, favorece à produção, uma vez que a linha de produção voltará às suas atividades em menor tempo.

6.2.11 Taxa de utilização da mão-de-obra

A taxa de utilização da mão de obra, apresentada na Tabela 6.13, é uma determinada porcentagem da capacidade de força de trabalho. A taxa de excesso tem a função de limitar o trabalho extraordinário. Ou seja, o aumento de homens hora (ou hora extra) é permitido até o ponto definido pela taxa de excesso. Da mesma forma, a taxa de folga limita a subutilização do funcionário.

Tabela 6.13: Taxa de Utilização da Mão-de-obra

Taxa de Excesso	50%
Taxa de Folga	50%

6.2.12 Demanda da manutenção

A demanda da manutenção define a data de realização de cada projeto de manutenção bem como sua periodicidade de execução ao longo do período de programação.

Conforme mencionado anteriormente, a frequência de realização de cada projeto foi determinada através do estudo do manual do fabricante de cada equipamento.

A Tabela 6.14 apresenta os projetos de manutenção programados para cada linha de produção nos períodos do horizonte de programação. A posição de cada elemento da tabela é determinada pelos índices linha (indica a linha de produção SMT) e coluna (indica o projeto de manutenção preventiva). O elemento da tabela pode assumir o valor **0** (zero) ou **1** (um). O valor **1** indica que no período em questão, o projeto p está programado para ser realizado na linha l .

Tabela 6.14: Demanda da Manutenção

Período 1									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	0	1	1	0	0	0	1	0	0
Mensal	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Período 2									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	1	0	0	1	1	1	0	0	1
Mensal	1	1	0	1	1	1	0	0	1
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Período 3									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	0	1	1	0	0	0	1	1	0
Mensal	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Trimestral	1	0	1	1	1	0	1	0	0

Período 4									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	1	0	0	1	1	1	0	0	1
Mensal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trimestral	0	1	0	0	0	1	0	1	1

Período 5									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	0	1	1	0	0	0	1	1	0
Mensal	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Período 6									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	1	0	0	1	1	1	0	0	1
Mensal	1	1	0	1	1	1	0	0	1
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

6.3 Análise dos Resultados

Para o primeiro teste do grupo 3, que é constituído de 3 projetos de MP, 9 linhas de produção SMT e 6 períodos no horizonte de programação, foram utilizados os dados da empresa BETA. Os resultados apresentados na Tabela 6.15 foram obtidos através do modelo proposto, onde a restrição 5.1 define que a quantidade total de alocações de projetos deve ser menor ou igual à demanda dos mesmos.

Tabela 6.15: Resultados do Grupo 3 - (Alocação \leq Demanda)

Instância	RESULTADOS							
	Excesso Total de HH	Folga Total de HH	Nº de Contratações	Nº de Demissões	Nº de Ativações do atraso	Nº de Ativações do antecipação	Nº de Ativação de sinergia	Nº de Demandas ã programadas
T21-3_9_06	398,31	0	0	0	5	6	19	1
T22-3_9_06	458,31	0	0	0	3	6	18	1
T23-3_9_06	492,89	0	0	0	5	6	18	2
T24-3_9_06	522,89	0	0	0	5	6	18	2
T25-3_9_06	550,39	0	0	0	9	9	21	2
T26-3_9_06	530,80	0	0	0	17	4	15	5

Instância	ALTERAÇÕES	Custo Total	Tempo Computac. médio (s)
T21-3_9_06	Instância Inicial ($G_{(0)} = 250$ HH)	90524	<1
T22-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 240$ HH)	93047	2,3
T23-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 230$ HH)	94530	2,0
T24-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 225$ HH)	94980	1,8
T25-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 210$ HH)	100909	10,4
T26-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 180$ HH)	114724	32,7

De posse dos resultados, pode-se observar que o problema inicial, com capacidade instalada de 250 *HH* por período, foi resolvido em um tempo computacional abaixo de 1 segundo. Esta solução apresentou um excesso de horas de trabalho igual a 398,31 *h*, computando atraso em 5 dos 51 projetos demandados. Apenas 1 projeto não foi programado para ser realizado no horizonte de programação considerado.

Sabe-se que a capacidade de mão-de-obra na BETA é muito variável, isto porque cada equipe de MP é composta por 2 operadores de linha, além dos operadores de manutenção e o técnico da linha. Normalmente, a capacidade de trabalho dos operadores de linha é muito discrepante, ora aumentando a força de trabalho do SMT, ora reduzindo a mesma. Por este motivo, foram feitos testes com diferentes capacidades de trabalho.

Reduzindo a capacidade do sistema, foi observado que, como o custo de superutilização do trabalho era baixo se comparado com o custo de contratação, o sistema optou por exceder ao invés de contratar, uma vez que este excesso estava dentro do limite máximo permitido (50% da capacidade). Porém, com a redução gradual da força de

trabalho, a necessidade de horas extra também aumentava. A partir do momento que não era mais permitido exceder, mesmo sendo interessante economicamente, o sistema optou por não programar alguns projetos ao invés de contratar, pois esta representava a opção de menor custo total.

Tabela 6.16: Resultados do Grupo 3 - (Alocação = Demanda)

Instância	RESULTADOS							
	Excesso Total de HH	Folga Total de HH	Nº de Contratações	Nº de Demissões	Nº de Ativações do atraso	Nº de Ativações do antecipação	Nº de Ativação de sinergia	Nº de Demandas ã programadas
T21-3_9_06	491,48	0	0	0	4	10	21	0
T22-3_9_06	552,48	0	0	0	2	10	20	0
T23-3_9_06	608,48	0	0	0	2	9	20	0
T24-3_9_06	642,48	0	0	0	3	11	20	0
T25-3_9_06	642,48	0	1	0	3	11	20	0
T26-3_9_06	642,48	0	1,2	0	3	11	20	0
T27-3_9_06	642,48	0	1,3	0	3	11	20	0
T28-3_9_06	642,48	0	1,4	0	3	11	20	0
T29-3_9_06	642,48	0	1,5	0	3	11	20	0
T30-3_9_06	726,86	0	0,9	0	3	11	20	0

Instância	ALTERAÇÕES	Custo Total	Tempo Computac. médio (s)
T21-3_9_06	Instância Inicial ($G_{(0)} = 250$ HH)	92185	<1
T22-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 240$ HH)	94707	5,0
T23-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 230$ HH)	96184	4,3
T24-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 225$ HH)	97691	36,7
T25-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 224$ HH)	102442	273,1
T26-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 223,8$ HH)	103393	821,4
T27-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 223,7$ HH)	103868	1142,7
T28-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 223,6$ HH)	104343	2013,0
T29-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 223,5$ HH)	104818	3122,0
T30-3_9_06	↓ Capacidade ($G_{(0)} = 210$ HH) E= 60%	103411	111,50

Supondo-se que não fosse permitido deixar de realizar algum projeto de manutenção demandado no horizonte de programação, foram realizados outros testes conforme a condição acima e, utilizando-se das instâncias do grupo anterior. Os resultados deste novo grupo, estão expostos na Tabela 6.16.

Sem a possibilidade de não realizar algum projeto de manutenção, a solução encontrada pelo modelo foi exceder até próximo do limite máximo, que era de aproximadamente 112,5 *HH* por período, e só então, contratar mais força de trabalho.

Porém, como a contratação onera mais a manutenção que o excesso, o sistema passou a contratar o estritamente necessário para complementar a capacidade de trabalho nos períodos em que não era mais possível exceder.

Pode-se observar que o maior excesso economicamente interessante (642,48 *HH*) para este grupo de teste foi atingido na instância T24. Como a capacidade continuou a ser reduzida e, ao mesmo tempo, não era mais possível deixar de programar os projetos e o excesso estava próximo do limite em quase todos os períodos, o sistema optou pela contratação de uma determinada força de trabalho equivalente à redução da capacidade instalada na instância, se comparada com a da instância T24 (Capacidade = 225 *HH*).

Quando o limite de excesso permitido no sistema aumentou, na instância T30, o sistema reduziu o índice de contratação e voltou a superutilizar a força de trabalho.

6.3.1 Custo da manutenção preventiva na BETA

Conforme mencionado anteriormente, o indicador utilizado para avaliar as ações de manutenção na BETA é o tempo de parada (*downtime*) de máquinas. Porém, atualmente, a empresa não dispõe de uma ferramenta adequada para avaliar os custos relacionados a programação das tarefas de MP.

Neste caso, de posse do registro histórico de realização da manutenção preventiva na BETA, apresentado na Tabela 6.17, estimou-se os custos inerentes a estas atividades utilizando-se o modelo proposto. O propósito desta ação é prover uma base de comparação com o resultado de alocação ótima gerado, possibilitando análises comparativas entre o sistema de alocação existente na empresa BETA e os ganhos que podem ser obtidos com a migração deste para o algoritmo aqui proposto.

Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 6.19 e 6.18. Foi possível perceber que, devido aos atrasos e antecipações na realização da manutenção, o custo total da manutenção na BETA foi muito elevado, se comparado à solução do modelo proposto, apresentada na Tabela 6.20.

A atual programação das atividades de manutenção da BETA está distante da que é exigida nos planos e padrões de manutenção da empresa. Isto pode ser explicado,

Tabela 6.17: Datas de Realização da Manutenção Preventiva na BETA

Alocação - Período 1									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	0	0	1	1	1	0	1	0	0
Mensal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Alocação - Período 2									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	0	1	1	0	0	0	1	0	0
Mensal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Alocação - Período 3									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	1	0	0	1	1	0	0	0	1
Mensal	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Alocação - Período 4									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	1	0	1	1	0	0	1	1	0
Mensal	0	0	1	1	0	0	1	1	0
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Alocação - Período 5									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Mensal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Alocação - Período 6									
Proj / Lin	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Quinzenal	0	1	0	1	1	0	1	1	1
Mensal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trimestral	0	0	0	0	0	0	0	0	0

em parte, pelo aumento de linhas de produção no SMT, ocorrido no final de 2005, sem que a BETA se estruturasse para tal expansão.

No horizonte de tempo considerado, ocorreram atrasos em 33 projetos, sendo que 17 destes não foram programados. Já a solução proposta aponta 5 ativações de atraso, ocorrendo apenas 1 projeto não programado. Ou seja, o custo de atraso pago atualmente na BETA é cerca de 24 vezes maior que o da solução ótima.

Tabela 6.18: Resultados da Manutenção Preventiva na BETA

RESULTADOS - Estudo de Caso							
Excesso Total de HH	Folga Total de HH	Nº de Contratações	Nº de Demissões	Nº de Ativações do atraso	Nº de Ativações do antecipação	Nº de Ativação de sinergia	Nº de Demandas ã programadas
133,89	291,62	145,3	186,2	33	6	5	17

Outra característica da solução foi a otimização da sinergia entre projetos. Enquanto os registros da BETA apontam 5 ativações de sinergia, o que representa um desconto de R\$ 9.420,00 no custo total da manutenção, a programação computacional indica 19 acionamentos de sinergia, com um desconto total de R\$ 32.029,00.

Tabela 6.19: Custo de Manutenção da BETA

$C_{i,t}$	
R\$ 79.769,00	
$CA_{tr,t}$	$CA_{nt,t}$
R\$ 191.046,00	R\$ 41.304,00
CE_t	CF_t
R\$ 2.008,00	R\$ 2.625,00
CHI_t	CFi_t
R\$ 690.434,00	R\$ 147.433,00
Custo Total	
R\$ 1.145.199,00	

De maneira geral, 78% dos projetos foram programados conforme recomendação dos fabricantes e, 98% dos projetos ocorreram dentro do horizonte de programação considerado. Já em relação ao custo total das atividades de MP, o modelo apresentou uma redução de 92,1%, passando de R\$ 1.145.199,00 para R\$ 90.524,00 em todo o horizonte de programação

Diante dos resultados do modelo, fica evidente que a programação matemática

Tabela 6.20: Resultado do Estudo de Caso

$C_{i,t}$	
R\$ 100.745,00	
$C_{Atr,t}$	$C_{Ant,t}$
R\$ 7.971,00	R\$ 7.862,00
$C_{E,t}$	$C_{F,t}$
R\$ 5.975,00	R\$ 0,00
CH_i,t	CF_i,t
R\$ 0,00	R\$ 0,00
Custo Total	
R\$ 90.524,00	

mostrou ser uma técnica eficaz para otimização do cronograma de MP, minimizando os custos inerentes à manutenção.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, bem como as recomendações de trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

Em mercados dinâmicos como o de eletroeletrônicos, é crescente a intenção das grandes empresas de adotar a relação de Manufatura Contratada com o objetivo de reduzir os custos, tornando-se, assim, mais competitivas.

Outra característica importante deste mercado é a crescente tendência à produção de grandes variedades de produtos em pequenos volumes de produção, denominadas de HMLV.

Diante deste cenário, o presente trabalho apresentou um modelo para alocação otimizada dos projetos de manutenção preventiva e evidenciou a eficiência da sua solução.

A natureza combinatorial do problema apresentado neste trabalho, aumenta significativamente o número de possíveis cronogramas de MP, dificultando a definição de uma solução adequada para um horizonte de programação de longo prazo.

Para fins de planejamento estratégico, é possível estimar o custo anual de

manutenção preventiva relaxando algumas restrições do modelo. Porém, para fins operacionais e ainda considerando as características do ambiente estudado, o horizonte de programação adotado pode ser considerado de "longo prazo".

Pode-se perceber a complexidade do ambiente estudado, observando sua instabilidade devido a rápida mutação tecnológica, produção em HMLV, *lead time* longo, necessidade de responder rapidamente às variações da demanda entre outros.

Uma vez que a sistemática desenvolvida mostrou-se capaz de formular planos de paradas consistentes de acordo com as características do ambiente estudado, pode-se considerar que o objetivo deste trabalho foi atingido, sendo necessário, entretanto, fazer uso da ferramenta com visão crítica.

Foi possível perceber que as alterações realizadas nos parâmetros durante as etapas de teste e análise da sensibilidade do modelo resultaram, na sua maioria, em uma programação de manutenção coerente com as modificações efetuadas.

Observa-se, entretanto, que existem possibilidades de melhoria do modelo proposto e, desta forma, a abordagem e os recursos adotados na solução do problema não podem ser considerados totalmente esgotados.

7.2 Trabalhos Futuros

Dentre as diversas áreas que poderiam ser alvo de desenvolvimento da metodologia, destaca-se a programação estocástica para a modelagem e a otimização da manutenção preventiva. Conforme mencionado anteriormente, a maior parte dos artigos e trabalhos relacionados com a questão específica da manutenção concentram-se na análise das variáveis intrinsecamente ligadas à condição dos equipamentos.

Esse grupo de modelos, normalmente captam as questões de aleatoriedade, porém, seus resultados são baseados em indicadores estatísticos. Pode-se afirmar, portanto, que estes modelos não consideram a dinâmica dos problemas de manutenção em termos de programação das atividades no tempo.

Já os modelos baseados em programação linear, como o proposto neste tra-

balho, captam a dinâmica da programação no tempo, entretanto falham em não captar os aspectos estocásticos das variáveis de decisão do problema de manutenção, isto é, não incorporam características de variação dos parâmetros no tempo, incluindo as componentes aleatórias.

Existe, portanto, uma lacuna nesta área de pesquisa, o que abre a possibilidade para realização de estudos e trabalhos voltados à otimização da manutenção através de modelos de programação estocástica.

Outro ponto importante é o estudo de técnicas de solução para o modelo proposto, visto que, segundo Wagner (1986), estes são de grande complexidade tanto do ponto de vista de solução analítica, quanto da complexidade computacional do problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABINEE, . *Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica*.
- [2] ALVES, E. P. *Como Lidar com a Característica de Baixo Volume de Produção e Alto Mix de Produtos no Controle Estatístico de Processos*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Produção, UFMG, Belo Horizonte, 2003.
- [3] BALLESTERO-ALVAREZ, M. E. *Administração da Qualidade e da Produtividade: Abordagens do Processo Administrativo*. Atlas, São Paulo-SP, 2001.
- [4] BARTHOLOMEW-BIGGS, M.; CHRISTIANSON, B.; ZUO, M. “Optimizing Preventive Maintenance Models”. *Computational Optimization and Applications*, v. 35, p. 261–279, 2006.
- [5] BERGER, J. “Defining and Predicting the Growth of EMS”. *Circuits Assembly EMS Supplement*, www.circuitsassembly.com, 2000.
- [6] BIREWAR, D. B.; GROSSMANN, I. E. “Simultaneous Production Planning and Scheduling in Multiproduct Batch Plants”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 29, p. 570–580, 1990.
- [7] BOHORIS, G. A.; VAMVALIS, C.; TRACEY, W.; IGNATIADOU, K. “TPM Implementation in Land-Rover with the Assistance of a CMMS”. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 1, p. 3–16, 1995.
- [8] CYR, B.; LAMBERT, S.; ABDUL-NOUR, G.; ROCHETTE, R. “Manufacturing Flexibility: SMT Factors Study”. *Computers and Industrial Engineering*, v. 33, p. 361–364, 1997.

- [9] DEKKER, R. “Applications of Maintenance Optimization Models: A Review and Analysis”. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 51, p. 229–240, 1996.
- [10] DEMING, W. E. *Qualidade: A Revolução da Administração*. Marques Saraiva, Rio de Janeiro-RJ, 1990.
- [11] DUNDICS, P. E. D. “Reliability-Centered Maintenance Returns Benefits”. *Quality*, v. 39, p. 54–58, 2000.
- [12] ETI, M. C.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. “Reducing the Cost of Preventive Maintenance (PM) through Adopting a Proactive Reliability-Focused Culture”. *Applied Energy*, v. 83, p. 1235–1248, 2006.
- [13] FARLOW, D. “Efficient Line Changeover”. *SMT Magazine*, p. 44–45, 2005.
- [14] FERREIRA, A. B. H. *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*. Nova Fronteira, Rio de Janeiro-RJ, 1994.
- [15] GABBAR, H. A.; YAMASHITA, H.; SUZUKI, K.; SHIMADA, Y. “Computer-Aided RCM-based plant Maintenance Management System”. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, v. 19, p. 449–458, 2003.
- [16] HIPKIN, I. B.; COCK, C. D. “TQM and BPR: Lessons for Maintenance Management”. *The International Journal of Management Science*, v. 28, p. 277–292, 2000.
- [17] HUNT, I.; JONES, R. “Winning New Product Business in the Contract Electronics Industry”. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 18, p. 130–142, 1998.
- [18] IMAI, Y. *TPM como Estratégia Empresarial*. Imc Internacional, São Paulo-SP, 2000.
- [19] KIJIMA, M.; MARIMURA, H.; SUZUKI, Y. “Periodical Replacement Problem without assuming Minimal Repair”. *European Journal of Operational Research*, v. 37, p. 194–203, 1988.

- [20] KODALI, R.; CHANDRA, S. “Analytical Hierarchy Process for Justification of Total Productive Maintenance”. *Production Planning & Control*, v. 12, p. 695–705, 2001.
- [21] LAFRAIA, J. R. B. *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Qualitymark, Rio de Janeiro-RJ, 2001.
- [22] LEVNER, E.; ZUCKERMAN, D.; MEIROVICH, G. “Total Quality Management of a Production - Maintenance Systems: A Network Approach”. *International Journal of Production Economics*, v. 56–57, p. 407–421, 1998.
- [23] LJUNGBERG, Ö. “Measurement of Overall Equipment Effectiveness as a Basis for TPM Activities”. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 18, p. 495–507, 1998.
- [24] NACIF, R. S. *A Influência da Estrutura Organizacional na Execução dos Processos de Manutenção*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Produção, UFMG, Belo Horizonte, 2001.
- [25] NAKAGAWA, T. “Optimum Policies when Preventive Maintenance is Imperfect”. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 28, p. 331–331, 1979.
- [26] NAKAGAWA, T. “Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies”. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 37, p. 295–298, 1988.
- [27] NAKAGAWA, T. *Stochastic Models in Reliability and Maintenance*, chapter Imperfect Preventive Maintenance Models, p. 125–153. Springer, Berlin, 2002.
- [28] NAKAJIMA, S. *TPM - Development Program*. Productivity Press, Cambridge, 1982.
- [29] NAKAJIMA, S. *Introdução ao TPM: Total Productive Maintenance*. IMC Internacional Sistemas Educativos, São Paulo-SP, 1989.
- [30] NAZARETH, W. S. *Curso de Gerência da Manutenção*. Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro-RJ, 1965. (Apostila).

- [31] PARDUE, F.; PEITY, K.; MOORE, R. “Elements of Reliability Based Maintenance”. *Maintenance*, p. 1–8, 1994.
- [32] PHAM, H.; WANG, H. “Imperfect Maintenance”. *European Journal of Operational Research*, v. 94, p. 425–438, 1996.
- [33] PINTO, A. K.; NASCIF, J. *Manutenção: Função Estratégica*. Qualitymark, Rio de Janeiro - RJ, 2001.
- [34] PINTO, J. M.; GROSSMANN, I. E. “Assignment and Sequencing Models for the Scheduling of Process Systems”. *Annals of Operations Research*, v. 81, p. 433–466, 1998.
- [35] RABAK, C. S.; SICHMAN, J. S. “Otimização do Processo de Inserção Automática de Componentes Eletrônicos empregando a Técnica de Times Assíncronos”. *Pesquisa Operacional*, v. 21, p. 39–59, 2001.
- [36] ROCHA, D. X. *Otimização do Planejamento da Manutenção Preventiva em Sistemas Complexos, com Foco na Cadeia de Suprimentos*. Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2002.
- [37] SANTOS, W. B. *Determinação da Periodicidade da Manutenção Preventiva em Sistemas Reparáveis*. Dissertação de mestrado, Departamento de Estatística, UFMG, Belo Horizonte, 2003.
- [38] SAVSAR, M. “Effects of Maintenance Policies on the Productivity of Flexible Manufacturing Cells”. *The International Journal of Management Science*, v. 34, p. 274–282, 2006.
- [39] SHERWIN, D. “A Review of Overall Models for Maintenance Management”. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.
- [40] SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação*. 4ª Edição revisada, UFSC, Florianópolis-SC, 2005. Disponível em: <http://www.ppgep.ufsc.br>, acesso em: 12/06/2006.

- [41] STUART, I.; MCCUTCHEON, D.; HANDFIELD, R.; MCLACHLIN, R.; SAMSON, D. “Effective Case Research in Operations Management: A Process Perspective”. *Journal of Operations Management*, v. 20, p. 419–433, 2002.
- [42] STURGEON, T. J. “Turnkey Production Networks: A New American Model of Industrial Organization?”. *Berkeley Roundtable on the International Economy*, 1997.
- [43] STURGEON, T. J. “Turnkey Production Networks: Organizational Delinking of Production from Innovation?”. *In Jurgens U. New Product Development and Production Networks*, Springer- Verlag, Berlin, 2000.
- [44] SUZUKI, T. *TPM - Total Productive Maintenance*. JIPM & IMC, São Paulo-SP, 1993.
- [45] SWANSON, L. “Linking Maintenance Strategies to Performance”. *International Journal of Production Economics*, v. 70, p. 237–244, 2001.
- [46] TAKAHASHI, Y.; OSADA, T. *TPM/MPT Manutenção Produtiva Total*. Instituto IMAN, São Paulo-SP, 1993.
- [47] TAVARES, W. M. L. *A Indústria Eletrônica no Brasil e seu Impacto sobre a Balança Comercial*. Consultoria Legislativa, 2001.
- [48] TONDATO, R. *Manutenção Produtiva Total: Estudo de Caso na Indústria Gráfica*. Dissertação de mestrado profissionalizante, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- [49] TORRES, N. *Fatores Contribuintes para a Obtenção da Qualidade do Produto numa Empresa Prestadora de Serviços de Manufatura Contratada de Produtos Eletrônicos*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Produção, UFMG, Belo Horizonte, 2001.
- [50] TSANG, A. H. C. *Maintenance Performance Management in Capital Intensive Organizations*. Tesis of phd in mechanical & industrial engineering, University of Toronto, Toronto, Canadá, 200.

- [51] WAGNER, H. M. *Principles of Operations Research with Applications to Managerial Decisions*. Prentice-Hall, London, 1972.
- [52] WAGNER, H. M.; GIGLIO, R. J.; GLASER, R. G. “Preventive Maintenance Scheduling by Mathematical Programming”. *Management Science*, v. 10, p. 316–334, 1964.
- [53] WANG, H. “A Survey of Maintenance Policies of Deteriorating Systems”. *European Journal of Operational Research*, v. 139, p. 469–489, 2002.
- [54] WIREMAN, T. *Developing Performance Indicators in Managing Maintenance*. Industrial Press Inc., New York-NY, 1998.
- [55] XENOS, H. G. *Gerenciando a Manutenção Produtiva*. DG, Belo Horizonte-MG, 1998.
- [56] YIN, R. K. *Estudo de Caso*. Bookman, Porto Alegre-RS, 2001.
- [57] ZYSMAN, J. “Production in a Digital Era: Commodity or Strategic Weapon?”. *Berkeley Roundtable on the International Economy*, Working Paper 147, 2002.

Apêndice A

Modelo de Manutenção

```

/* IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DO WAGNER */

/* CONJUNTOS */
set S; /* semanas */
set P; /* projetos */

/* PARÂMETROS */
param Start {p in P, s in S};
param ManPow {p in P, w in S};
param Ns; /* numero de semanas no horizonte de planejamento */
param D {p in P, t in S: t<Ns} := ManPow[p,t] - ManPow[p,t+1];

/* VARIÁVEIS */
var x {p in P, s in S} binary;
var Gs {w in S} >= 0;
var Hs {w in S} >= 0;

/* FUNÇÃO OBJETIVO */
minimize desvio: sum {s in S} (Hs[w]+Gs[w]);

/* RESTRIÇÕES */
s.t. StartWeek {p in P}: sum {s in S: Start[p,s] = 1} x[p,s] = 1;
s.t. Deviation {w in S: w>0 and w<Ns}:
    sum {p in P, s in S: Start[p,s] = 1 and w >= s-1 } D[p, w - s + 1] * x[p,s] = Gs[w] - Hs[w];

solve;
end;

```

Implementação do Modelo Proposto por Wagner *et al.* [52]

```

/* DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO */

set S:= 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10; /* Horizonte de programação */
set P:= 1 2 3 4 5 6 7 8; /* Projetos de manutenção preventiva */

param Ns:= 10; /* Número total de semanas */

param Start: /* Possíveis semanas (coluna da matriz) para início do projeto (linha da matriz) */
  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 :=
  1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0
  2 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0
  3 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
  4 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0
  5 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0
  6 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0
  7 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
  8 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0
;

param ManPow: /* Mão-de-obra para um projeto (linha da matriz) em cada semana (coluna da matriz) */
  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 :=
  1 0 10 10 0 0 0 0 0 0 0 0
  2 0 5 20 5 0 0 0 0 0 0 0
  3 0 5 10 15 0 0 0 0 0 0 0
  4 0 10 10 20 20 0 0 0 0 0 0
  5 0 10 20 10 0 0 0 0 0 0 0
  6 0 25 10 10 25 10 0 0 0 0 0
  7 0 5 5 5 25 0 0 0 0 0 0
  8 0 10 5 5 10 0 0 0 0 0 0
;

```

Dados de Entrada do Modelo

```
/* RESULTADOS DO MODELO */
```

```
Problem:   Wagner (1964)
Rows:      18
Columns:   46 (24 integer, 24 binary)
Non-zeros: 144
Status:    INTEGER OPTIMAL
Objective: desvio = 60 (MINimum) 36.32352941 (LP)
```

No.	Row name	Activity	Lower bound	Upper bound
1	desvio	60		
2	StartWeek[1]	1	1	=
3	StartWeek[2]	1	1	=
4	StartWeek[3]	1	1	=
5	StartWeek[4]	1	1	=
6	StartWeek[5]	1	1	=
7	StartWeek[6]	1	1	=
8	StartWeek[7]	1	1	=
9	StartWeek[8]	1	1	=
10	Deviation[1]	0	0	=
11	Deviation[2]	0	0	=
12	Deviation[3]	0	0	=
13	Deviation[4]	0	0	=
14	Deviation[5]	0	0	=
15	Deviation[6]	0	0	=
16	Deviation[7]	0	0	=
17	Deviation[8]	0	0	=
18	Deviation[9]	0	0	=

No. Column name	Activity	Lower bound	Upper bound
1 x[1,3]	*	0	1
2 x[1,4]	*	1	1
3 x[1,5]	*	0	1
4 x[2,6]	*	1	1
5 x[2,7]	*	0	1
6 x[2,8]	*	0	1
7 x[3,1]	*	0	1
8 x[3,2]	*	1	1
9 x[3,3]	*	0	1
10 x[4,6]	*	0	1
11 x[4,7]	*	1	1
12 x[5,1]	*	1	1
13 x[5,2]	*	0	1
14 x[5,3]	*	0	1
15 x[5,4]	*	0	1
16 x[6,5]	*	1	1
17 x[6,6]	*	0	1
18 x[7,1]	*	0	1
19 x[7,2]	*	0	1
20 x[7,3]	*	1	1
21 x[8,4]	*	0	1
22 x[8,5]	*	0	1
23 x[8,6]	*	0	1
24 x[8,7]	*	1	1
25 Gs[0]		0	0
26 Gs[1]		0	0
27 Gs[2]		0	0
28 Gs[3]		0	0
29 Gs[4]		0	0
30 Gs[5]		0	0
31 Gs[6]		0	0
32 Gs[7]		5	0
33 Gs[8]		10	0
34 Gs[9]		5	0
35 Gs[10]		0	0
36 Hs[0]		0	0
37 Hs[1]		15	0
38 Hs[2]		0	0
39 Hs[3]		5	0
40 Hs[4]		10	0
41 Hs[5]		0	0
42 Hs[6]		10	0
43 Hs[7]		0	0
44 Hs[8]		0	0
45 Hs[9]		0	0
46 Hs[10]		0	0
End of output			

Resultados Obtidos

TABLE 3
Project Equations

Project	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}
1 =	1	1	1												
2 =															
3 =															
4 =															
5 =															
6 =															
7 =															
8 =															

TABLE 4
Total Required Manpower Per Week: [M]

Week	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}
1																		
2																		
3	10																	
4	10	10																
5		10	10															
6			10															
7				5														
8				20	5													
9				5	20	5												
10							20											

Explanatory Note: Project 1, requiring 10 men in the first week and 10 men in the second week, can begin in week 3, 4, or 5.

Resultados Apresentados por Wagner *et al.*[52]

Apêndice B

Dados do Modelo

B.1 Tempo de execução do projeto de manutenção

Linha de Produção	Nº do Equipamento	Quinz	Mens.	Trim.
ANDROMEDA	HSP 015 4796 - Universal	350	650	925
	HSP 005 4796 - Universal	350	650	925
	Forno MF11 - Micriflo	0	100	0
	GSM 002 Flex Head / Flex Head	300	1575	150
	GSM 007 Flex Jet / Flex Jet	300	1575	150
	Printer 002 MPM - 2000	0	200	250
	PTF 001 Universal	225	900	0
TOTAL	tempo em minutos	1525	5650	2400
	tempo em horas	25,42	94,17	40,00
APOLO	PTF 002 Universal	225	900	0
	Printer 004 MPM - 2000	0	200	250
	GSM 004 Flex Head / Flex Head	300	1575	150
	Forno 001 MF11 - Micriflo	0	100	0
	HSP 001 4796L - Universal	350	650	925
	HSP 009 4796L - Universal	350	650	925
TOTAL	tempo em minutos	1225	4075	2250
	tempo em horas	20,42	67,92	37,50
ATHENAS	PTF 003 Universal	225	900	0
	FUJI 001 CP-6	0	1250	375
	Forno XPM2 - Vitronics	0	100	0
	GSM 001 Flex Jet / Flex Head	300	1575	150
	Printer 001 MPM - 3000	0	200	250
	HSP 010 4796L - Universal	350	650	925
	HSP 014 4796L - Universal	350	650	925
TOTAL	tempo em minutos	1225	5325	2625
	tempo em horas	20,42	88,75	43,75

DRAGON	GSM 006 Flex Head / Flex Head	300	1575	150
	HSP 006 4796 - Universal	350	650	925
	Forno 007 TF-10 - Thermaflo	0	100	0
	Printer 005 MPM - 2000	0	200	250
	PTF 006 Universal	225	900	0
TOTAL	tempo em minutos	875	3425	1325
	tempo em horas	14,58	57,08	22,08
PEGASUS	PTF 005 Universal	225	900	0
	Printer 003 Dek	0	200	250
	GSM 003 Flex Jet / Flex Head	300	1575	150
	Forno 003 XPM2 - Vitronics	0	100	0
	HSP 003 4797B - Universal	225	900	925
	HSP 004 4797B - Universal	225	900	925
TOTAL	tempo em minutos	975	4575	2250
	tempo em horas	16,25	76,25	37,50
PHOENIX	HSP 011 4796 - Universal	350	650	925
	Forno 005 TF10N - Thermaflo	0	100	0
	GSM 005 Flex Head / Flex Head	300	1575	150
	PTF 004 Universal	225	900	0
	Printer - MPM 3000	0	200	250
TOTAL	tempo em minutos	875	3425	1325
	tempo em horas	14,58	57,08	22,08
QUIMERA	HSP 007 4796R - Universal	350	650	925
	HSP 008 4796R - Universal	350	650	925
	GSM 009 Flex Head / Flex Head	300	1575	150
	Forno 008 TF-10N - Thermaflo	0	100	0
	Printer 009 MPM 2000	0	200	250
	PTF 008 Universal	224	900	0
TOTAL	tempo em minutos	1224	4075	2250
	tempo em horas	20,40	67,92	37,50
SCORPIONS	PTF 007 Universal	225	900	0
	Printer 006 Dek	0	200	250
	GSM 008 Flex Head / Flex Head	300	1575	150
	Forno 006 XPM2 - Vitronics	0	100	0
	HSP 4796L - Universal	350	650	925
	HSP 002 4797L - Universal	225	900	925
	HSP 013 4796L - Universal	350	650	925
TOTAL	tempo em minutos	1450	4975	3175
	tempo em horas	24,17	82,92	52,92
TITAN	GSM 010 Flex Head / Flex Head	300	1575	150
	Forno 002 MF11 - Micriflo	0	100	0
	FUJI 003 CP-642	0	1250	375
	FUJI 004 FUJI	0	1250	375
	Printer 007 MPM - 2000	0	200	250
	PTF 009 Universal	225	900	0
TOTAL	tempo em minutos	525	5275	1150
	tempo em horas	8,75	87,92	19,17

B.2 Programação da produção e Receita esperada

Andrômeda			Pégasus		
Período	Demanda	Receita Prevista	Período	Demanda	Receita Prevista
1	1.505	1.974,36	1	2.450	2.800,87
2	3.789	4.970,66	2	2.386	2.727,70
3	4.166	5.465,24	3	1.207	1.379,86
4	3.937	5.164,82	4	1.431	1.635,94
5	3.143	4.123,20	5	1.574	1.799,42
6	1.346	1.765,77	6	807	922,57

Apolo			Phoenix		
Período	Demanda	Receita Prevista	Período	Demanda	Receita Prevista
1	3.705	2.444,44	1	2.917	1.916,67
2	2.455	1.619,73	2	1.920	1.261,57
3	4.206	2.774,98	3	1.300	854,19
4	1.234	814,15	4	954	626,84
5	994	655,81	5	1.680	1.103,88
6	1.008	665,05	6	1.280	841,05

Athenas			Quimera		
Período	Demanda	Receita Prevista	Período	Demanda	Receita Prevista
1	3.200	1.222,22	1	1.369	2.426,44
2	1.207	461,01	2	3.426	6.072,30
3	1.480	565,28	3	4.999	8.860,32
4	960	366,67	4	4.612	8.174,39
5	1.200	458,33	5	2.278	4.037,57
6	1.234	471,32	6	1.223	2.167,67

Dragon			Scorpions		
Período	Demanda	Receita Prevista	Período	Demanda	Receita Prevista
1	3.792	2.230,67	1	2.567	2.054,67
2	2.997	1.763,01	2	1.560	1.248,65
3	1.448	851,80	3	1.450	1.160,60
4	3.877	2.280,67	4	985	788,41
5	1.243	731,20	5	2.456	1.965,82
6	870	511,78	6	1.023	818,83

Titan		
Período	Demanda	Receita Prevista
1	4.556	3.672,44
2	4.933	3.976,33
3	1.718	1.384,82
4	2.356	1.899,09
5	1.563	1.259,88
6	1.003	808,48