

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

**SISTEMÁTICA PARA IMPLANTAÇÃO DA
GARANTIA DA QUALIDADE EM EMPRESAS
MONTADORAS DE PLACAS DE CIRCUITO
IMPRESSO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do grau de Mestre em Metrologia

Marcos Marinovic Doro

Florianópolis, 14 de junho de 2004

SISTEMÁTICA PARA IMPLANTAÇÃO DA GARANTIA DA QUALIDADE EM EMPRESAS MONTADORAS DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Marcos Marinovic Doro

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

ORIENTADOR

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph. D

COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Antônio Diomário de Queiroz, Dr. Eng.

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Mauro Faccioni Filho, Dr. Eng.

Günter Pfeiffer, M. Sc.

A todos os meus familiares, e de uma maneira especial ao meu pai, minha mãe e meus tios Carlos, Tó e tia Norma que foram impulsionadores deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, por abrir as portas para a realização do mestrado, a todos os professores, Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Carlos Alberto Flesch, Carlos Alberto Schneider e Marco Antônio Martins Cavaco, alunos e colaboradores que sempre me ajudaram durante esta caminhada.

Ao Prof. Gustavo Donatelli, mais que um orientador, um amigo que nunca mediu esforços para socorrer-me nas horas difíceis.

Ao LABelectron, a Fundação CERTI e a MegaflexSul que permitiram a concretização deste trabalho, em especial ao Güinter Pfeiffer e ao Mário Albuquerque que confiaram no meu trabalho.

A todos meus familiares que sempre me apoiaram para a realização dos meus estudos, em especial a tia Norma, que sempre procurou mostrar a todos o valor do saber.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS.....	12
RESUMO.....	14
ABSTRACT.....	15
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	18
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2 PROCESSOS DE MONTAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO E PRINCIPAIS TIPOS DE DEFEITOS	21
2.1 PROCESSO DE MONTAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO UTILIZANDO A TECNOLOGIA TH	22
2.2 PROCESSO DE MONTAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO UTILIZANDO A TECNOLOGIA SMT.....	25
2.3 TIPOS DE MONTAGENS E DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	29
2.4 DEFEITOS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	32
2.5 SÍNTESE	34
3 GARANTIA DA QUALIDADE NA MONTAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	35
3.1 GARANTIA DA QUALIDADE NO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	37
3.1.1 Projeto para manufaturabilidade (DFM)	37
3.1.2 Projeto para testabilidade (DFT)	38
3.2 GARANTIA DA QUALIDADE NO DESENVOLVIMENTO E PLANEJAMENTO DO PROCESSO.....	39
3.2.1 Fluxograma	39
3.2.2 Diagrama de Pareto	39
3.2.3 Diagrama de causa-efeito	40

3.2.4	Análise dos modos de falhas do processo e seus efeitos (PFMEA)	42
3.2.5	Delineamento de experimentos (DOE)	44
3.2.6	Plano de controle	45
3.2.7	Plano de reação	48
3.2.8	Treinamentos	49
3.2.9	Procedimentos	49
3.3	GARANTIA DA QUALIDADE NA PRODUÇÃO	50
3.3.1	Controle estatístico de processo (CEP)	50
3.3.2	Manutenção	52
3.3.3	Diário de bordo	53
3.3.4	Rastreabilidade	53
3.4	INSPEÇÃO E TESTE	54
3.4.1	Inspeção	54
3.4.1.1	Inspeção visual manual (MVI) ou inspeção humana	55
3.4.1.2	Inspeção óptica automática (AOI)	56
3.4.1.3	Inspeção raio-X	57
3.4.2	Teste	58
3.4.2.1	Teste de circuito ou in-circuit (ICT)	59
3.4.2.2	Teste funcional	60
3.4.3	Estratégias de inspeção e teste	60
3.5	ASPECTOS METROLÓGICOS	63
3.5.1	Calibração	63
3.5.2	Estudos de repetitividade e reprodutibilidade (GR&R)	64
3.6	INDICADORES DE DESEMPENHO	67
3.6.1	Indicadores de qualidade	67
3.6.2	Indicadores de produtividade	68
3.7	NORMAS E RECOMENDAÇÕES	68

3.7.1 Desenvolvimento do produto.....	69
3.7.2 Desenvolvimento do processo e produção.....	69
3.7.3 Inspeção e teste	70
3.7.4 Cálculo de indicadores	70
3.7.5 Gestão da qualidade	71
3.8 SÍNTESE	71
4 SISTEMÁTICA DE IMPLANTAÇÃO DA GARANTIA DA QUALIDADE	73
4.1 FASE 1 OU FASE DE ANÁLISE E SISTEMATIZAÇÃO DOS PROCESSOS .	77
4.1.1 Metodologia de implantação da Fase 1.....	79
4.1.1.1 Planejamento e definição do processo.....	79
4.1.1.2 Produção	81
4.1.1.3 Análise da qualidade	84
4.1.1.4 Normas e recomendações.....	87
4.1.2 Considerações finais sobre a Fase 1	87
4.2 FASE 2 OU FASE DE CONTROLE E MELHORIA DOS PROCESSOS	89
4.2.1 Metodologia de implantação da Fase 2.....	92
4.2.1.1 Planejamento e definição do processo.....	92
4.2.1.2 Produção	95
4.2.1.3 Análise da qualidade	97
4.2.1.4 Normas e recomendações.....	98
4.2.2 Considerações finais sobre a Fase 2	99
4.3 FASE 3 OU FASE DE OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS.....	100
4.3.1 Metodologia de implantação da Fase 3.....	102
4.3.1.1 Planejamento e definição do processo.....	102
4.3.1.2 Produção	105
4.3.1.3 Análise da qualidade	106
4.3.1.4 Normas e recomendações.....	107
4.3.2 Considerações finais sobre a Fase 3	107

4.4 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A SISTEMÁTICA APRESENTADA.....	109
5 UM ESTUDO DE CASO: IMPLANTAÇÃO INFORMATIZADA DA FASE 1 DA SISTEMÁTICA NO LABELECTRON.....	110
5.1 ESTADO INICIAL DA EMPRESA.....	111
5.2 ESTRUTURAÇÃO DO SOFTWARE PARA IMPLANTAÇÃO DA FASE 1.....	113
5.3 ESTUDO DE CASO UTILIZANDO O SOFTWARE PARA IMPLANTAÇÃO DA FASE 1	116
5.3.1 DFM <i>checklist</i>	117
5.3.2 Lista de componentes e layout da placa	119
5.3.3 Índice de complexidade.....	120
5.3.4 Fluxograma e plano de controle	121
5.3.5 Rastreabilidade	126
5.3.6 Parâmetros de processo	126
5.3.7 Diário de bordo	127
5.3.8 Histórico do processo	128
5.3.9 Controle de defeitos no cliente	130
5.3.10 Histórico do cliente	132
5.3.11 Resultados obtidos	133
6 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES FUTURAS	134
6.1 CONCLUSÕES	134
6.2 OPORTUNIDADES FUTURAS	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico ilustrando a produção mundial de placas de circuito impresso no ano de 2000 ^[2]	17
Figura 2 - Difusão da sistemática de implantação da garantia da qualidade.....	20
Figura 3 – Montagem de componente utilizando a tecnologia TH ^[4]	21
Figura 4 – Montagem de componente utilizando a tecnologia SMT ^[4]	22
Figura 5 – Principais tipos de pacotes de componentes TH ^[6]	23
Figura 6 - Esquema de funcionamento da máquina de solda por onda	24
Figura 7 - Equipamentos que compõem uma típica linha de montagem TH.....	24
Figura 8 - Processo de deposição da pasta de solda ^[8]	25
Figura 9 - Principais tipos de pacotes de componentes SMT ^[6]	26
Figura 10 – Método de funcionamento das cabeças posicionadoras das máquinas de inserção automática de componentes SMT ^[13]	27
Figura 11 - Perfil térmico usado na refusão da pasta de solda (Sn63Pb37 ou Sn62Pb36Ag2) ^[15]	28
Figura 12 – Equipamentos que compõem uma típica linha de montagem SMT ...	29
Figura 13 - Placa de circuito impresso composta de componentes TH e SMT ^[17] .	30
Figura 14 - Detalhe construtivo dos diferentes tipos de placas de circuito impresso.....	31
Figura 15 - Possíveis combinações de montagem das placas de circuito impresso ^[18]	31
Figura 16 - Distribuição de defeitos nas tecnologias TH e SMT ^{[23], [24],[25]}	33
Figura 17 - Enlace entre os métodos de garantia da qualidade no processo de montagem de placas de circuito impresso (adaptado de ^[27])	36
Figura 18 - Diagrama de Pareto dos defeitos encontrados na montagem de placas de circuito impresso ^[23]	40
Figura 19 - Diagrama de causa-efeito para máquina de solda por onda.....	41
Figura 20 – Planilha para elaboração do PFMEA ^[37]	42
Figura 21 – Formulário para elaboração do plano de controle	46
Figura 22 - Gráfico de controle - ferramenta usada no controle estatístico do processo.....	51
Figura 23 - Princípio de funcionamento das máquinas AOI ^[52]	56

Figura 24 - Princípio de funcionamento das máquinas de inspeção por raio-X ^[50]	58
Figura 25 - <i>Flying prober</i> - Os pontos de contato são testados seqüencialmente ^[54]	59
Figura 26 - Exemplos de estratégias de inspeção e teste ^[23]	62
Figura 27 - Estruturação dos métodos de garantia da qualidade para montagem de placas de circuito impresso	71
Figura 28 - Sistemática de implantação da garantia da qualidade para o processo de montagem de placas de circuito impresso	74
Figura 29 - Ciclo do PDCA aplicado ao processo de montagem de placas de circuito impresso (adaptado de ^[41])	75
Figura 30 - Estrutura organizacional mínima para implantação da sistemática.....	76
Figura 31 – Conjunto de métodos e ferramentas da qualidade utilizados na Fase 1	77
Figura 32 – Conjunto de métodos e ferramentas da qualidade adicionados na Fase 2	90
Figura 33 – Conjunto de métodos e ferramentas da qualidade adicionados na Fase 3	101
Figura 34 - Detalhes da planta da Megaflex Sul.....	111
Figura 35 - Menu principal do software para implantação da Fase 1	114
Figura 36 - Menu principal do software com os dados referentes à placa usada no estudos de caso	117
Figura 37 - Formulário <i>DFM checklist</i> preenchido de acordo com a configuração da placa utilizada no estudo de caso	118
Figura 38 - Lista de componentes da placa usada no estudo de caso.....	119
Figura 39 - <i>Layout</i> e <i>silk-screen</i> de uma placa de circuito impresso	120
Figura 40 - Cálculo do índice de complexidade da placa	121
Figura 41 - Fluxograma para a montagem de uma placa do tipo SMT Top	122
Figura 42 - Janela do software para criação do plano de controle da placa	123
Figura 43 - Criação de etiquetas para identificação das placas	126
Figura 44 - Cadastro dos arquivos de configuração e parametrização da linha SMT	127
Figura 45 - Diário de bordo relatando as modificações ocorridas no processo ...	128

Figura 46 - Planilha de histórico do processo para registro dos defeitos encontrados na linha	129
Figura 47 - Diagrama de Pareto dos tipos de defeitos encontrados na inspeção.....	130
Figura 48 - Formulário de controle de defeitos.....	131
Figura 49 - Planilha para cadastrar os defeitos encontrados nos testes de placas executados pelo cliente.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de inspeção e teste versus cobertura de defeitos ^[56]	61
Tabela 2 - Características da empresa situada no “Estágio 1” da qualidade	78
Tabela 3 - Características da empresa situada no “Estágio 2” da qualidade	89
Tabela 4 - Características da empresa situada no “Estágio 3” da qualidade	100
Tabela 5 - Características da empresa situada no “Estágio 4” da qualidade	108
Tabela 6 - Características do estágio da qualidade da Megaflex Sul	111
Tabela 7 - Plano de controle para montagem da placa SMT Top	124
Tabela 8 - Plano de controle para montagem da placa SMT Top (continuação).	125

LISTA DE ABREVIATURAS

AOI	<i>Inspeção Óptica Automática (Automatic Optical Inspection)</i>
AXI	<i>Inspeção Raio-X Automática (Automatic X-ray Inspection)</i>
BGA	<i>Matriz de Bolas (Ball Grid Array)</i>
CEP	<i>Controle Estatístico de Processo</i>
CI	<i>Circuito Integrado</i>
DFM	<i>Projeto para Manufaturabilidade (Design for Manufacturing)</i>
DFT	<i>Projeto para Testabilidade (Design for Testing)</i>
DOE	<i>Delineamento de Experimentos (Design of Experiments)</i>
DPMO	<i>Defeitos por Milhão de Oportunidades (Defects per Million Opportunities)</i>
DPU	<i>Defeitos por Unidade (Defects Per Units)</i>
PFMEA	<i>Análise dos Modos de Falhas do Processo e seus Efeitos (Process Failure Modes and Effects Analysis)</i>
FPY	<i>Rendimento da montagem (First Pass Yield)</i>
GR&R	<i>Repetitividade e Reprodutibilidade de Instrumentos (Gage Repeatability and Reproducibility)</i>
ICT	<i>Teste de Circuito (In-Circuit Test)</i>
IPC	<i>Associação das Indústrias de Eletrônicos Interconectados (Association Connecting Electronics Industries)</i>
MVI	<i>Inspeção Visual Manual (Manual Visual Inspection)</i>
PCI	<i>Placa de Circuito Impresso</i>
PDCA	<i>Planejar, Executar, Verificar, Controlar (Plan, Do, Check, Act)</i>
PTH	<i>Revestido Através do Furo (Plated Through Hole)</i>
SMT	<i>Tecnologia de Montagem em Superfície (Surface Mount Technology)</i>
TH	<i>Através de Furo (Through-Hole)</i>

THT *Tecnologia Através de Furo (Through-Hole Technology)*

X-mR *Gráfico de valores individuais e amplitude móvel*

Xbar-R *Gráfico de média e amplitude*

RESUMO

A competitividade no mercado das placas de circuito impresso tem criado novos desafios para as empresas montadoras de placas de circuito impresso, obrigando essas empresas a produzirem produtos com qualidade comprovada. Caso a empresa esteja voltada ao mercado interno, os desafios ainda residem, pois é necessário competir com produtos acabados e subprodutos provenientes do mercado externo. Isto significa que as empresas são demandadas a produzir produtos de alta qualidade a preços acessíveis, exigindo um sistema da qualidade capaz de estabelecer regras que possibilite alcançar a qualidade classe mundial. Entretanto, de uma maneira geral, a implantação de efetivos programas de qualidade ainda não é prática comum das empresas brasileiras montadoras de placas de circuito impresso, principalmente pelas empresas de pequeno porte.

Este trabalho mostra uma sistemática para a implantação da garantia da qualidade capaz de melhorar progressivamente a qualidade e a eficiência das empresas montadoras de placas de circuito impresso. A sistemática propõe uma implantação em três fases, cada uma das quais acrescenta novas técnicas para melhoria da qualidade e novos e mais efetivos meios de inspeção, transformando progressivamente a cultura e capacidade da empresa para atingir patamares mais altos de qualidade e eficiência. A primeira fase é aplicável às empresas que ainda não possuem um sistema de garantia da qualidade e que operam com altos custos de má qualidade. O foco desta fase está na sistematização dos processos e na geração de evidência objetiva sobre a qualidade produzida. Para isso, propõe-se a utilização da metodologia do plano de controle e de ferramentas estatísticas básicas. A segunda fase adiciona o uso de ferramentas de análise de risco e sugere a aplicação do controle estatístico nas variáveis de produto e processo, com intuito de viabilizar a montagem com índices da qualidade aceitáveis. Já na terceira fase, propõe-se que a empresa otimize seus processos usando projeto de experimentos e adicione recursos de inspeção mais poderosos, com automação da coleta de dados sobre qualidade. A sistemática proposta foi parcialmente aplicada numa empresa montadora de placas de circuito impresso, e resultados preliminares mostraram-se promissores.

ABSTRACT

Today's competitive printed circuit board market has created new challenges to the printed circuit board assemblers, and to maintain their competitiveness, they have been forced to focus upon producing products of a consistently quality. Even those companies that are driven to domestic market only have been faced major competition due to importation of end products and components to be assembled. That means that companies need to produce high-quality products along with low cost, which require a sound quality management system that establish rules to keep the company in accordance with the current market issues and to make attainable the so-called world-class quality. However, generally speaking, the implementation of proper quality programs is not a standard practice when Brazilian small sized assemblers of printed circuit boards are took into consideration.

This master thesis presents an approach to the implementation of quality assurance systems in small sized assemblers of printed circuit boards, whose chief objectives are the continuous improvement of the product's quality and the of process and the growth of company's throughput. This approach divides the implementation of quality systems into three phases that gradually introduce new methods to reach higher quality levels. The first phase should be applied to those companies that still do not have a quality management system and that are facing high poor quality. To do that, this phase works in the understanding of assembling processes and quality concerns through control plans and basic statistical tools. The second phase uses risk analysis tools and proposes the use of statistical process control to evaluate product variables and process parameters. The goal of this phase is to make possible the assembly of printed circuit boards at reasonable quality rates. The third phase focuses on the optimisation of the company's activities through design of experiments and betterment of inspection resources and automation of quality data acquisition. The proposed approach has been applied to a Brazilian company of the realm of printed circuit boards, and the results up to now have brought to it substantial benefits.

1 INTRODUÇÃO

A placa de circuito impresso foi inventada pelo Dr. Paul Eisner, um cientista austríaco, após a Segunda Guerra Mundial. Ele estava trabalhando na Inglaterra com um conceito para substituir as ligações das válvulas do rádio por algo menos volumoso. O conceito desenvolvido foi similar a uma placa de circuito impresso de face simples e, desde então, vários tipos de placas foram criados. No início, eram feitas de materiais cerâmicos e foram evoluindo tecnologicamente, passando por diversas modificações e adaptações. Hoje, são produzidas com multicamadas e, normalmente, são feitas com um material laminado denominado FR-4 ^[1].

As placas de circuito impresso são elementos fundamentais, presentes em todo e qualquer bem eletrônico, seja de informática, telecomunicações, consumo, automatização ou módulo de eletrônica embarcada. A sua utilização, porém, determina que atenda a especificações mais ou menos rigorosas, de acordo com a complexidade e responsabilidade das tarefas a serem executadas pelo produto final.

A presença cada vez maior da eletrônica na vida do homem contemporâneo gerou grande crescimento no mercado mundial de placas de circuito impresso. Como indústria eletrônica globalizada, localizam-se nos países centrais (Estados Unidos e Japão) e na Europa, as fábricas de placas de maior agregado tecnológico, como aquelas placas de alta performance (para aviônicos, satélites, aplicações militares e médicas), as destinadas para grandes servidores e equipamentos de telecomunicações. Em economias emergentes, nas quais a qualificação da mão-de-obra já é elevada (por exemplo, Coréia, Taiwan e Singapura), são produzidas placas de média complexidade, como as destinadas a microcomputadores. Já as fábricas de placas de face simples, próprias para produtos de consumo, estão basicamente

concentradas na China, nas Filipinas e na Tailândia ^[2]. A Figura 1 ilustra a produção de placas de circuito impresso no mercado mundial.

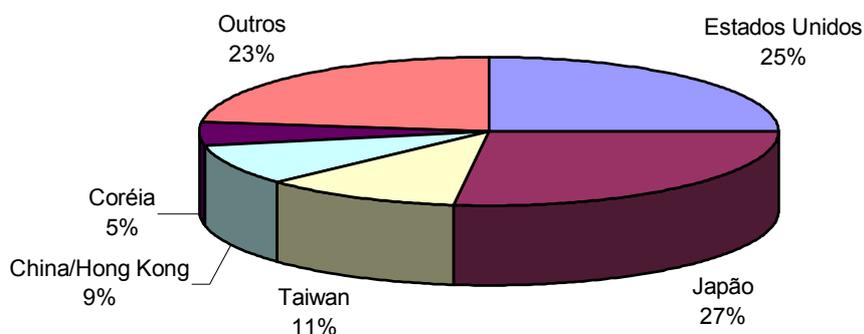


Figura 1 – Gráfico ilustrando a produção mundial de placas de circuito impresso no ano de 2000 ^[2]

No Brasil, a maior parte do mercado de placas de circuito impresso tem sido suprida por importações, pois a concorrência com os países asiáticos é extremamente difícil. Lá estão localizadas as principais fábricas de produtos eletrônicos do mundo e, assim, suas fábricas operam com grandes escalas, reduzindo significativamente os preços das placas produzidas. Além disso, bens eletrônicos recentes, como terminais celulares ou equipamentos de telecomunicações de última geração, utilizam placas extremamente complexas, cuja tecnologia de fabricação ainda não está disponível no país ^[2].

Desta forma, o número de empresas brasileiras fabricantes de placas de circuito impresso, que chegou a ser superior a 200 na década de 80, hoje se resume a cerca de 40. Por sua vez, estes fabricantes correspondem a uma oferta ainda pulverizada entre várias pequenas empresas, basicamente fornecedoras de placas convencionais para protótipos e séries muito pequenas, que atuam ao lado de alguns grandes fabricantes ^[2].

A competitividade para uma empresa montadora de placas de circuito impresso hoje é sobreviver num mercado de livre concorrência. Se a empresa não deseja exportar, ao menos terá que sobreviver às importações de produtos acabados ou de subprodutos, placas e componentes. Neste contexto, a gestão da

qualidade tem um papel fundamental. Sem ser o fundamento em si mesma, é segundo Juran ^[3], um conjunto de ações necessárias para que se alcance a qualidade de nível mundial. Isto requer uma transformação em relação ao pensamento e as atitudes habituais de gerenciamento praticados nas organizações. As empresas que se adequarem a esta nova realidade estarão atingindo um elevado potencial de qualidade, de produtividade e de competitividade.

Entretanto, de uma maneira geral, a implantação de efetivos programas de qualidade ainda não é buscada pelas empresas brasileiras montadoras de placas de circuito impresso, principalmente por empresas de pequeno porte. Isto ocorre pela dificuldade de implantação, devido a fatores como: produtos e processos complexos, custos altos com equipamentos, grande diversificação de produtos e lotes, tecnologia dinâmica, testes e inspeções laboriosos. Outro problema enfrentado é o escasso conhecimento do conteúdo, eficácia, possibilidades de uso e acessibilidade dos métodos de gestão da qualidade.

Esta ausência de efetivos sistemas de garantia da qualidade acarreta em altos tempos de retrabalho e altas taxas de defeitos em campo, ocasionando a perda de competitividade para as empresas fabricantes e montadoras de placas de circuito impresso e para seus potenciais clientes, o que leva a substituição das placas nacionais por importadas. Assim, a garantia da qualidade torna-se fundamental para empresas que atuam no mercado de placas de circuito impresso.

1.1 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação de mestrado é desenvolver uma solução para facilitar a implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso e, com isso, melhorar sua qualidade e competitividade.

De uma forma mais específica, apresentar uma sistemática para implantação da garantia da qualidade ao processo de montagem de placas de circuito impresso do LABelectron (Laboratório de Desenvolvimento e Testes de Processos e Produtos Eletrônicos). O LABelectron é um laboratório de manufatura eletrônica de placas de circuito impresso, voltado ao desenvolvimento e teste de processos e produtos eletrônicos, por meio da realização de pesquisas, desenvolvimento tecnológico e

serviços especializados. O laboratório está situado em Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina. O seu modelo de operação divide-se em duas vertentes distintas:

1. Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico: compreende um conjunto coordenado de atividades de pesquisa, desenvolvimento, capacitação e geração de protótipos e pré-séries. Nesta vertente o laboratório está disponível em 25% do seu tempo para a execução das atividades de pesquisa e desenvolvimento onde, parceiros do Consórcio Tecnológico (universidades, centros de formação profissional, centros tecnológicos) e empresas da região podem fazer uso da planta.

2. Serviços Especializados: compreende a operação da planta para fins de geração de serviços especializados a terceiros. Estes serviços são geridos por um parceiro industrial do LABelectron, a Megaflex Sul, uma empresa montadora de placas de circuito impresso com sede em São Paulo, que mantém operacional a planta. Cabe ressaltar aqui, que o mercado potencial de placas de circuito impresso no estado de Santa Catarina está formado por empresas de base tecnológicas incubadas, empresas fabricantes de aparelhos de telefonia, entre as quais se destaca a Intelbras, e outros grandes consumidores como WEG e Embraco.

O trabalho se justifica, dada a importância dos bens eletrônicos nos tempos atuais e as oportunidades que o LABelectron oferece para as empresas catarinenses que usam de placas de circuito impresso em seus produtos, oferecendo inclusive a possibilidade da montagem em pequenas séries para clientes de pequenas empresas, que é um real problema atualmente.

A sistemática de implantação da garantia da qualidade aplicada no LABelectron servirá como uma sistemática piloto para as demais empresas montadoras da região (Figura 2), já que o LABelectron possui uma disponibilidade de acesso para universidades, centros de formação profissional, centros tecnológicos e empresas da região, permitindo assim a difusão da sistemática para todas as empresas catarinenses montadoras de placas.

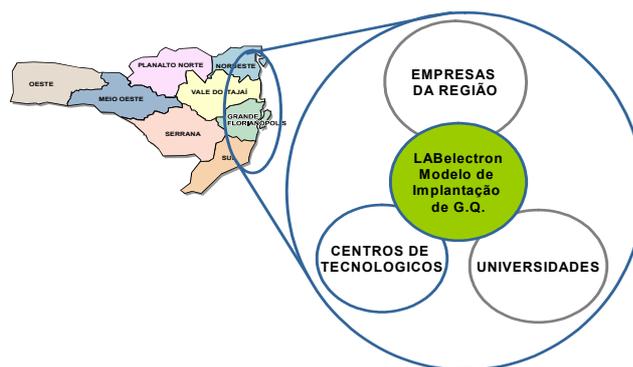


Figura 2 - Difusão da sistemática de implantação da garantia da qualidade

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para a execução deste trabalho tem-se no Capítulo 2 um levantamento bibliográfico sobre os processos de montagem de placas de circuito impresso, suas características, os tipos de componentes e placas, e os principais defeitos que podem existir em uma placa montada.

No Capítulo 3, ainda no âmbito do estado da arte, são apresentados os métodos de garantia da qualidade, bem como as técnicas de inspeção e os testes usados em placas de circuito impresso.

O Capítulo 4 apresenta, através de fases definidas por características próprias, uma sistemática para implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso.

No Capítulo 5 descreve-se a aplicação parcial da sistemática ao ambiente do LABelectron/Megaflex Sul e se apresenta um software para a implantação da Fase 1 da sistemática.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para estudos futuros.

No decorrer desta dissertação de mestrado serão utilizadas algumas palavras ou expressões em inglês, pois a tradução para o português não é comumente empregada na prática. Porém, ao serem apresentadas pela primeira vez no texto, estas palavras ou expressões serão traduzidas ou apresentada uma breve descrição sobre o significado das mesmas.

2 PROCESSOS DE MONTAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO E PRINCIPAIS TIPOS DE DEFEITOS

A placa de circuito impresso consiste de uma fina placa onde são impressas ou depositadas trilhas de cobre sobre um ou ambos os lados. Enquanto a placa se comporta como um isolante, as trilhas têm a função de conectar eletricamente os diversos componentes, para executarem suas funções no circuito.

Os componentes são soldados em ilhas, também conhecidos como *pads*. Ilhas são partes das trilhas com espaço para uma junta de solda entre o terminal do componente e a placa. As ilhas podem possuir furos para facilitar a montagem dos componentes (*through-hole technology*) ou os componentes podem ser inseridos diretamente sobre a superfície das ilhas (*surface mount technology*).

Na montagem através de furos (TH), criada por volta de 1940, os componentes possuem terminais salientes e longos, e as placas possuem furos eletricamente conectados às trilhas de metal (Figura 3). Sistemas dessa natureza são fáceis para construir, testar e trabalhar, entretanto, em projetos muito complexos, o hardware é fisicamente grande e poderá ser eletricamente ruidoso para aplicações em média e alta frequência [4].

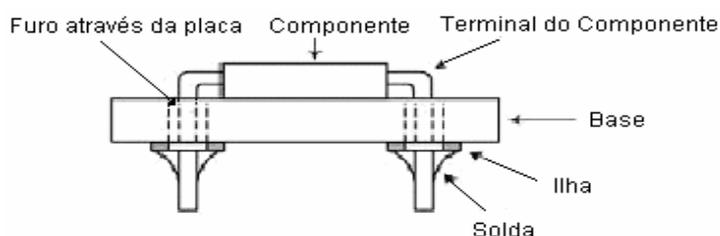


Figura 3 – Montagem de componente utilizando a tecnologia TH [4]

Já a montagem em superfície (SMT) os componentes são soldados sobre a superfície da placa, não necessitando assim, que a placa seja perfurada (Figura 4). Esta tecnologia surgiu na metade dos anos 60 e ainda está evoluindo rapidamente. Inicialmente, os componentes eram produzidos em pacotes similares aos componentes TH, onde os terminais eram cortados e moldados para permitir a soldagem sobre a superfície da placa. Hoje, a largura dos terminais e a geometria dos componentes estão continuamente sendo reduzidas [4].

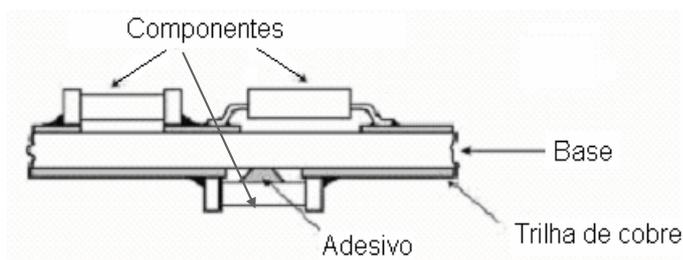


Figura 4 – Montagem de componente utilizando a tecnologia SMT [4]

A manufatura de uma placa de circuito impresso envolve a seleção de componentes, o *layout* da placa e os processos de fabricação, montagem e teste. Durante estas etapas vários defeitos podem ser gerados. Entender a origem e as conseqüências dos defeitos é fundamental para que ações corretivas e preventivas sejam tomadas no produto e no processo.

2.1 PROCESSO DE MONTAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO UTILIZANDO A TECNOLOGIA TH

Este tipo de montagem consiste basicamente de duas atividades fundamentais: inserção dos componentes e soldagem dos componentes.

No processo de inserção, os componentes podem ser inseridos automaticamente ou manualmente nos furos da placa. A inserção automática é executada por máquinas, que são alimentadas por fitas contendo componentes TH. Os componentes são apanhados da alimentação, moldados e inseridos automaticamente nos furos da placa. Para a máquina poder se referenciar é necessário que a placa possua “furos guias”, estes furos são posicionados normalmente próximo aos cantos da placa. Entretanto, estas máquinas são capazes de inserir automaticamente somente os componentes TH dos tipos axiais, radiais e

CI's (DIP) (Figura 5), sendo que os demais tipos de componentes devem ser inseridos manualmente [5].

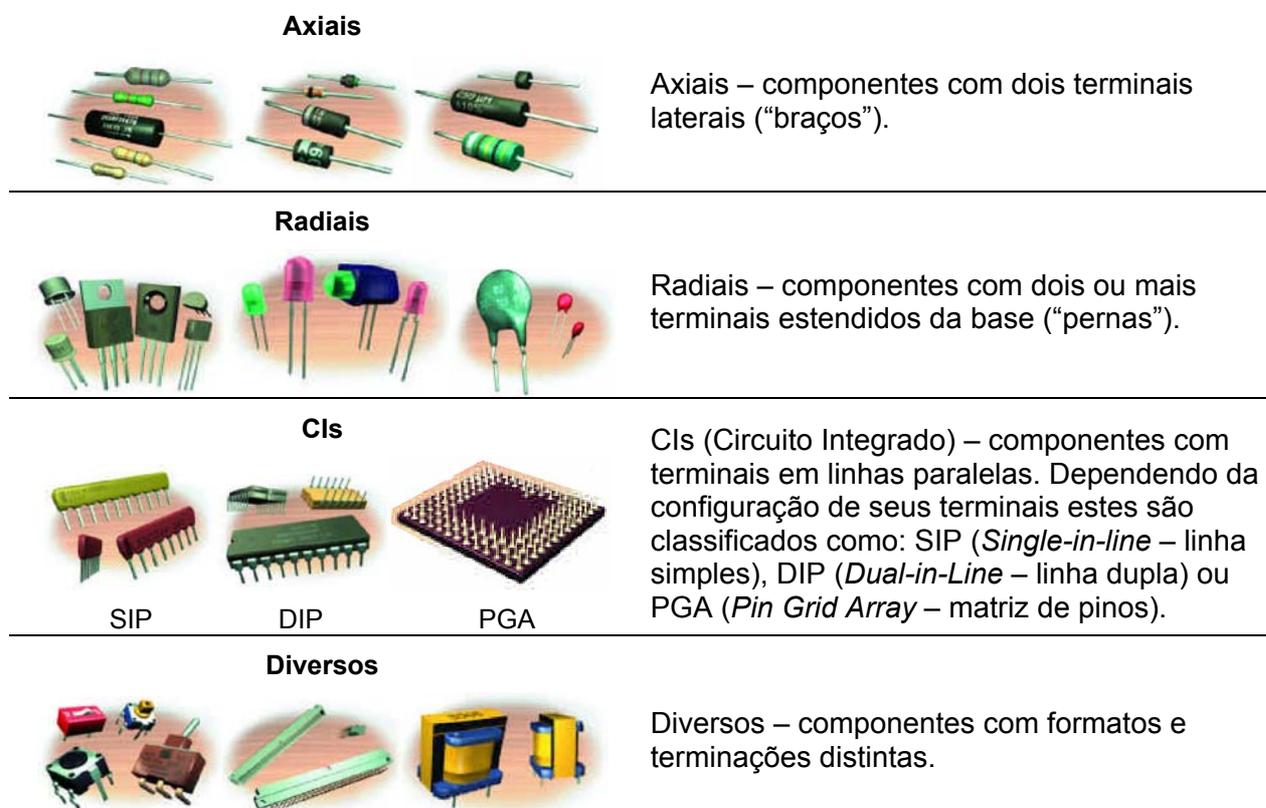


Figura 5 – Principais tipos de pacotes de componentes TH [6]

O processo de inserção manual inicia-se com a pré-formagem dos componentes, etapa onde os componentes são cortados, dobrados e separados. Logo em seguida, é feita a inserção dos componentes na placa. A inserção manual é muito propensa a erros, portanto é recomendável utilizar máquinas de inserção semi-automática que orientam a posição e o sentido da montagem [5].

Após todos os componentes serem inseridos na placa é executada a soldagem através da máquina de solda por onda. Neste processo a placa é transportada em uma esteira, passando tangencialmente em algumas cubas e por uma zona de pré-aquecimento (Figura 6). Na primeira etapa, a placa é banhada em uma cuba contendo fluxo (compostos químicos formado por solvente e ativadores, tendo como padrão álcool isopropílico e resina baseada em colofonia, produto natural obtido de várias espécies de pinos) [7], cuja função é remover o óxido presente nas superfícies a serem soldadas e protegê-las da re-oxidação. Em seguida, a placa passa por uma zona de pré-aquecimento, a fim de evitar um

choque térmico do componente e ativar o fluxo. Finalmente, a placa passa tangencialmente pela cuba contendo a liga de solda fundida. A liga fundida adere aos terminais dos componentes e aos furos, formando liga nas interfaces, e preenche os furos com o material que irá solidificar-se. Deste modo, promoverá a soldagem do componente. Contudo, um correto ajuste da máquina de solda requer um alto grau de conhecimento em química de superfície, metalurgia e mecânica dos fluídos. Desta forma, a probabilidade de gerar juntas defeituosas neste processo é muito alta [8].

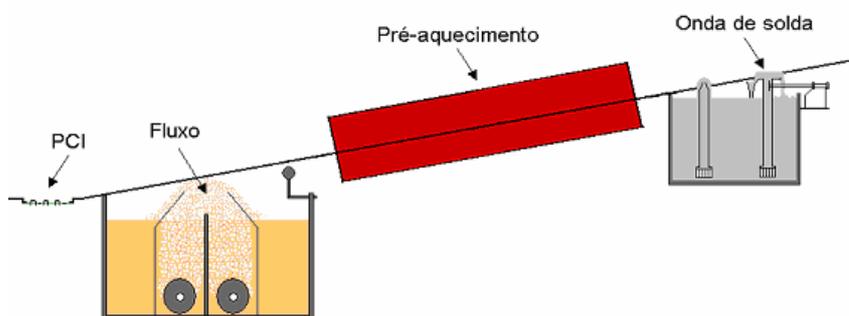


Figura 6 - Esquema de funcionamento da máquina de solda por onda

A Figura 7 ilustra o fluxo de montagem de uma placa de circuito impresso no processo TH.

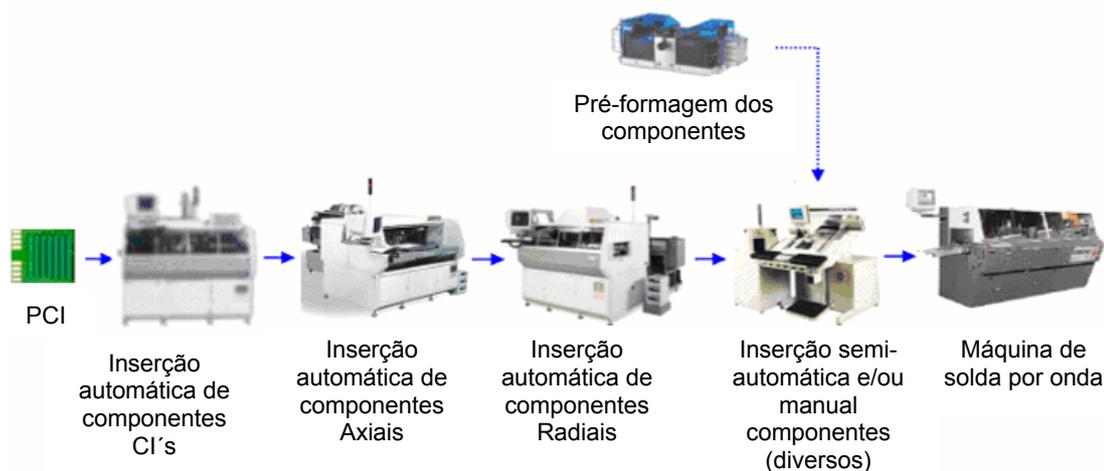


Figura 7 - Equipamentos que compõem uma típica linha de montagem TH

2.2 PROCESSO DE MONTAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO UTILIZANDO A TECNOLOGIA SMT

A montagem SMT pode ocorrer utilizando o processo de soldagem por refusão, ação de aplicar calor suficiente de modo que ocorra a separação da solda e do fluxo e posteriormente o derretimento da solda ^[9], ou através do processo de soldagem pela máquina de solda por onda, que foi apresentada na seção anterior.

Na montagem SMT por refusão, a primeira etapa a ser feita é a deposição da pasta de solda sobre as ilhas, localizadas na superfície da placa. O material que compõem a pasta de solda é constituído por um pó metálico (63%Sn/37%Pb ou 62%Sn36%Pb/2%Ag) e uma combinação de materiais (resina, ativadores, aditivos reológicos e solventes) chamado de fluxo de solda ou “sistema de veículo” ^{[10].[11]}. A deposição da pasta de solda é feita normalmente por um processo de impressão serigráfica. Neste processo, conforme mostra a

Figura 8, um rodo pressiona e espalha a pasta de solda sobre uma tela metálica vazada (estêncil), permitindo a passagem da pasta somente sobre as ilhas da placa.



1 – Rodo empurra estêncil para baixo e força entrada de pasta de solda nas aberturas

2 – Pasta de solda preenche as aberturas e adere nas ilhas da placa

3 – Estêncil deixa a pasta de solda sobre as ilhas na forma de blocos retangulares

Figura 8 - Processo de deposição da pasta de solda ^[8]

A próxima etapa consiste na inserção de componentes sobre a pasta de solda aplicada, esta operação é executada através das máquinas de inserção automática. Existem basicamente duas topologias de máquinas de inserção de componentes SMT: a *Turret Head* (cabeçote revólver) e a *Pick & Place* (apanhar e inserir). As

máquinas *Turret Head* foram projetadas para inserirem pequenos componentes em alta velocidade (10.000 a 60.000 cph – *chip* por hora) ^[12], enquanto que as máquinas *Pick & Place* inserem componentes maiores, tais como *fine pitches* e *Ball Grid Array* (Figura 9), com uma maior exatidão na inserção.

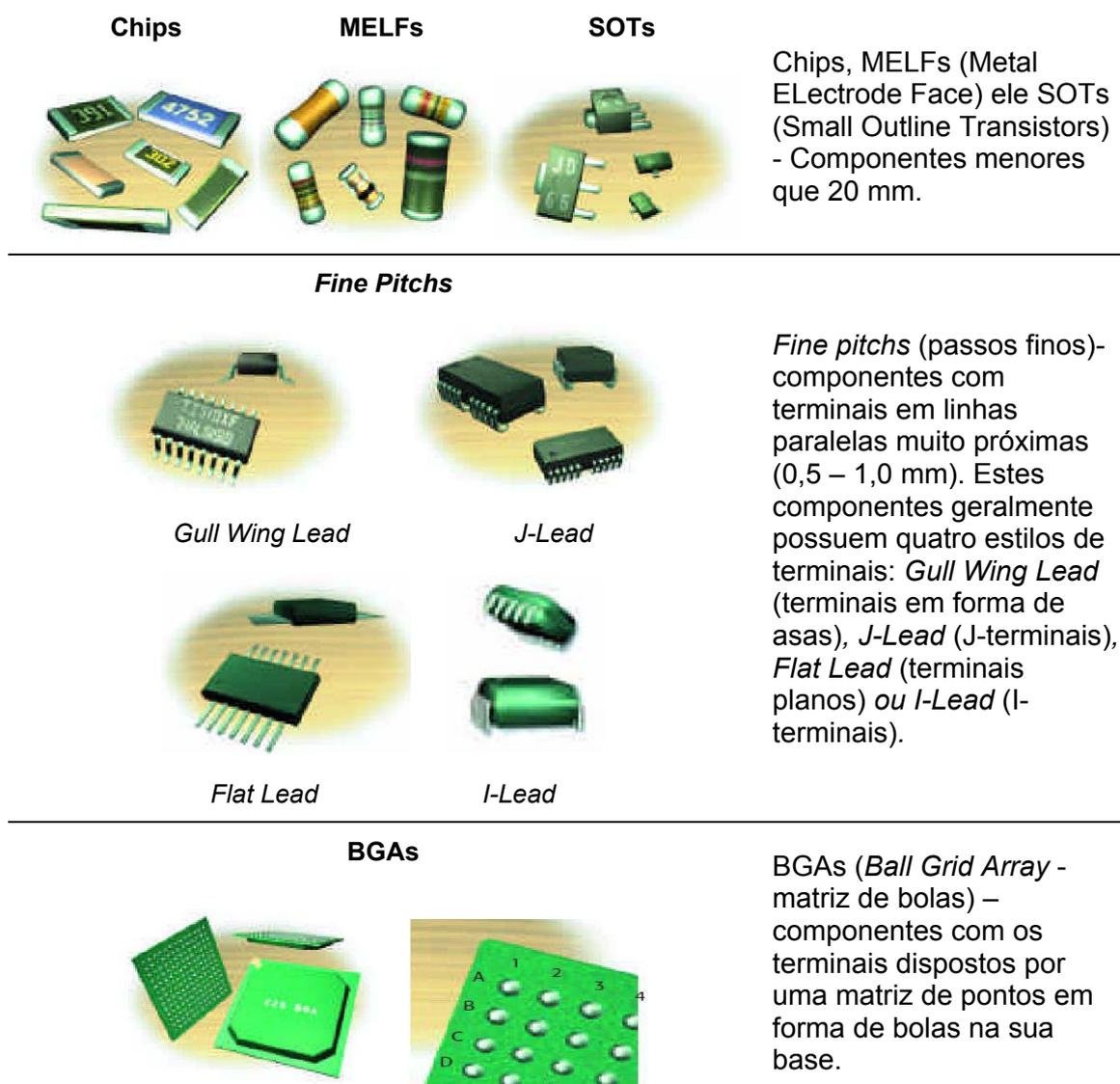


Figura 9 - Principais tipos de pacotes de componentes SMT ^[6]

A maior diferença entre estas máquinas está no transporte do componente do alimentador para a placa (Figura 10). As máquinas *Turret Head* possuem cabeças posicionadoras rotativas, estas apanham os componentes numa posição e colocam em outra. Os alimentadores são movimentados para a posição de apanhar os componentes e a placa é movimentada na direção X e Y em posição de inserção.

Nas máquinas *Pick & Place* a cabeça posicionadora é montada sobre um eixo X-Y, que apanha o componente de um alimentador numa posição fixa e transporta-o até a posição onde deve ser inserido na placa.

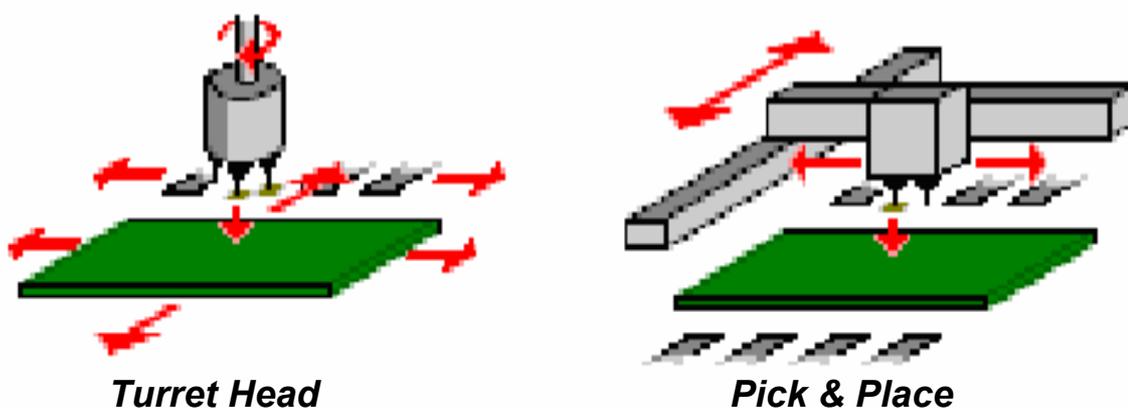


Figura 10 – Método de funcionamento das cabeças posicionadoras das máquinas de inserção automática de componentes SMT ^[13]

Para conseguir referenciar-se com a placa, estas máquinas utilizam um sistema de visão que reconhece as marcas fiduciais na placa. Marcas fiduciais são pequenas figuras (círculos, quadrados, losangos) de cobre geralmente situadas nas extremidades da placa. Um fator importante a ser controlado é a pressão de inserção. Pressões muito altas podem danificar os componentes ou a placa. Se a pressão for muito baixa o componente poderá permanecer na cabeça posicionadora, sem ser transferido para a placa, podendo, portanto, se soltar sobre a placa ou dentro da posicionadora ^[13].

A última etapa a ser realizada é a soldagem entre o componente e a placa, através do processo de refusão da pasta de solda. Normalmente esta etapa é realizada em um forno que aquece a placa por convecção forçada, denominado de forno de refusão. Uma esteira rolante possibilita que a placa avance através do forno. O forno possui zonas com temperaturas diferenciadas ao longo do caminho percorrido pela placa.

A refusão da pasta de solda acontece através do “perfil térmico” do forno, ou seja, a curva da temperatura da placa em função do tempo (Figura 11). Este perfil é formado de quatro fases distintas ^[14]:

- Pré-aquecimento – nesta fase a temperatura é elevada da ambiente à de evaporação dos solventes da pasta de solda.
- Desgaseificação – nesta fase a temperatura é elevada lentamente com o propósito de ativar o fluxo e igualar a temperatura na placa.
- Refusão – nesta fase a temperatura é elevada para que as esferas de solda se fundam, formando então a junta de solda.
- Resfriamento – a temperatura é reduzida gradativamente até a temperatura ambiente.

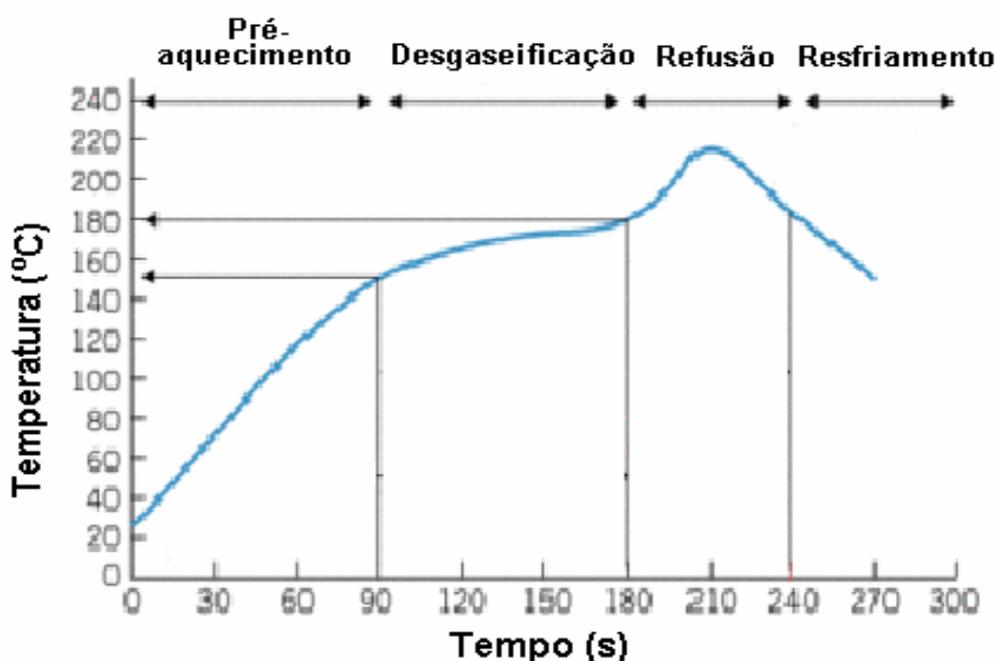


Figura 11 - Perfil térmico usado na refusão da pasta de solda (Sn63Pb37 ou Sn62Pb36Ag2) ^[15]

Já no processo SMT onde a soldagem é executada pela máquina de solda por onda, a deposição de pasta de solda é substituída pela aplicação de adesivo. O adesivo possui a função de segurar os componentes durante a soldagem. As demais etapas, inserção de componentes e aquecimento da placa, continuam acontecendo. Porém as zonas de aquecimento do forno (perfil térmico) são modificadas, pois sua função agora é curar o adesivo. Após os componentes serem inseridos e colados na placa é executada a soldagem pela máquina de solda por onda, da mesma forma que ocorre no processo TH ^[16]. Cabe ressaltar que a soldagem através da máquina

de solda por onda ocorre somente quando a placa de circuito impresso é constituída por componentes TH na face de cima e componentes SMT na face de baixo.

A Figura 12 ilustra o fluxo de montagem de uma placa de circuito impresso no processo SMT.

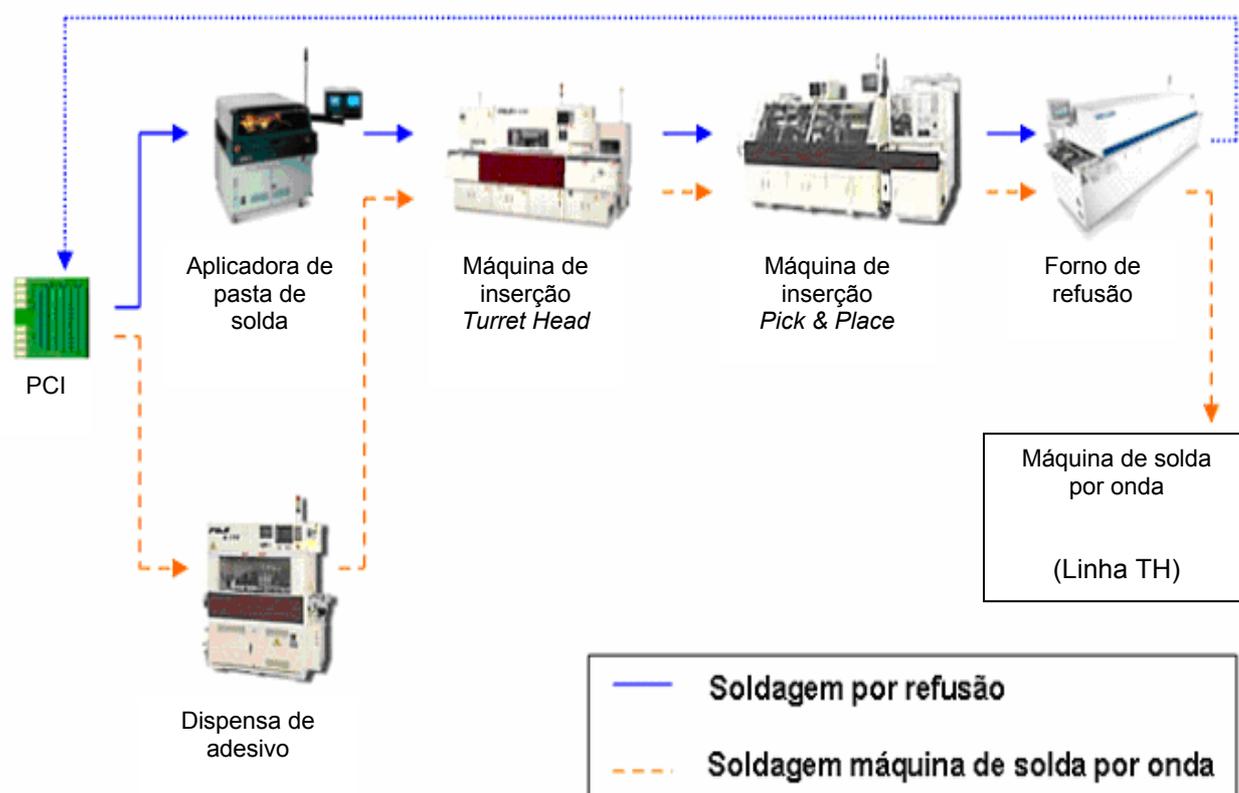


Figura 12 – Equipamentos que compõem uma típica linha de montagem SMT

2.3 TIPOS DE MONTAGENS E DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

A etapas de montagem de uma placa de circuito impresso está relacionada com a escolha dos diferentes tipos de placas e de componentes. Dependendo da sua característica ou necessidade, um produto poderá conter somente componentes TH, somente componentes SMT ou ambos. Além disso, os componentes podem ser montados em uma ou em ambas as faces da placa. Um exemplo de placa de circuito impresso composta por componentes SMT e TH na mesma face é mostrado na Figura 13.

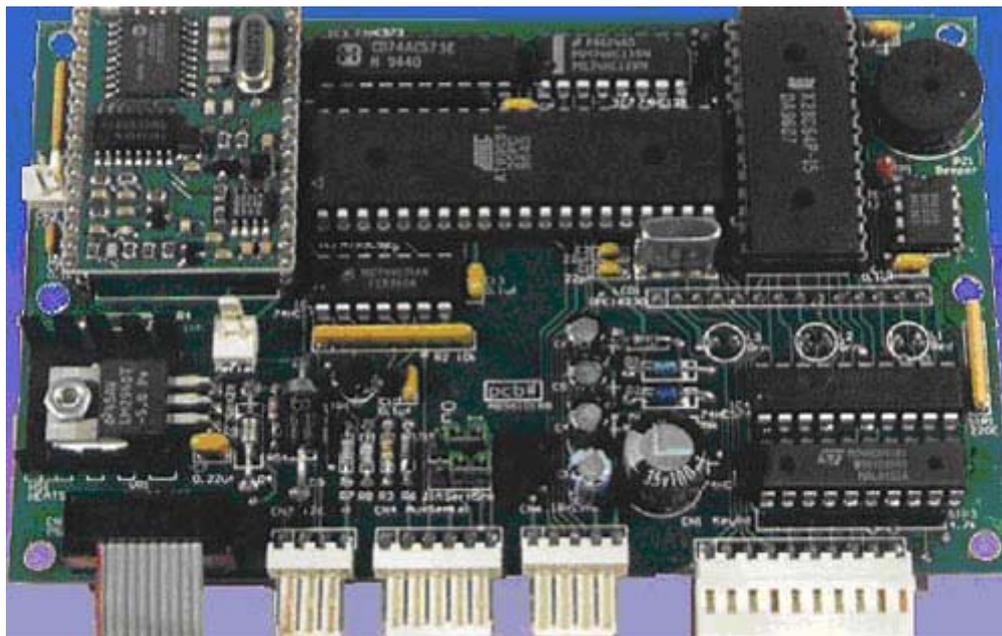


Figura 13 - Placa de circuito impresso composta de componentes TH e SMT^[17]

As placas de circuito impresso mais comumente empregadas são ^[4]:

- Face simples - Possuem trilhas condutivas sobre um lado da placa. Neste tipo de placa os componentes TH são inseridos do lado oposto das trilhas e os componentes SMT são inseridos do mesmo lado das trilhas.
- Dupla face - Possuem trilhas condutivas sobre dois lados da placa. Elas podem ser consideradas como a junção de duas placas de face simples, desta forma, a densidade de componentes aumenta significativamente. A face de cima e a face de baixo da placa podem ser conectadas por um furo metalizado (vias de contato). A metalização destes furos é feita por um processo de revestimento, por esta razão estes furos são chamados de PTH – Plated Through Hole (revestido através do furo).
- Multicamadas - Possuem várias camadas de trilhas, sendo duas localizadas na superfície da placa. As trilhas internas são construídas num processo de laminação que encaixa as trilhas sobre as camadas. As placas multicamadas são usadas geralmente onde o *layout* da placa é muito complexo.

A Figura 14 ilustra o detalhe construtivo dos diferentes tipos de placas de circuito impresso.

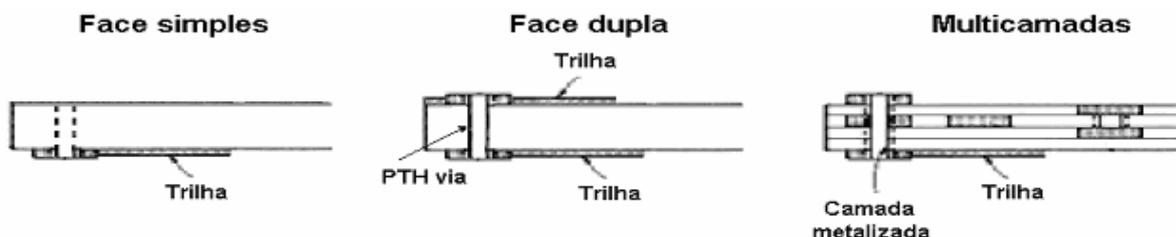


Figura 14 - Detalhe construtivo dos diferentes tipos de placas de circuito impresso

Os três tipos de placas de circuito impresso mencionados podem ser usados no processo de montagem, onde são soldados os diversos tipos de componentes SMT e TH. A Figura 15 contém os possíveis tipos de montagem de uma placa de circuito impresso.

<p style="text-align: center;">TH Top</p>	<p>Composta por componentes TH sobre um lado da placa.</p>
<p style="text-align: center;">SMT Top</p>	<p>Composta por componentes SMT sobre um lado da placa.</p>
<p style="text-align: center;">SMT Top e Bottom</p>	<p>Composta por componentes SMT sobre os dois lados da placa.</p>
<p style="text-align: center;">TH Top / SMT Bottom</p>	<p>Composta por componentes SMT sobre um lado da placa e componentes TH sobre o outro lado da placa.</p>
<p style="text-align: center;">TH Top / SMT Top</p>	<p>Composta por componentes SMT e componentes TH, ambos montados na mesma face da placa.</p>
<p style="text-align: center;">TH Top / SMT Top e Bottom</p>	<p>Composta por componentes SMT sobre os dois lados da placa e por componentes TH sobre um lado da placa.</p>

Figura 15 - Possíveis combinações de montagem das placas de circuito impresso^[18]

Deste modo, uma placa de circuito impresso pode ser manufaturada de diversas formas. Entretanto, é de grande importância que o projeto de uma placa de

circuito impresso leve em consideração o processo de fabricação e montagem, a fim de que ações preventivas sejam tomadas, como por exemplo: minimizar as etapas de fabricação e montagem, evitar operações manuais, escolher componentes menos propensos a gerar defeitos de montagem, criar partes padrões.

2.4 DEFEITOS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

A manufatura de uma placa de circuito impresso envolve várias etapas, sendo que, durante estas etapas, existem várias oportunidades de defeitos ocorrerem. Os defeitos numa placa de circuito impresso montada podem ser divididos em três categorias básicas ^{[19],[20],[21],[22]}:

- Defeitos nos componentes ou placas: os defeitos desta categoria não são gerados propriamente pelo processo de montagem. Eles são causados devido à má qualidade dos componentes ou das placas, pelo armazenamento, transporte ou manuseio incorreto. Os principais defeitos associados a componentes e placas são: componente eletricamente defeituoso; componente ou placa danificados; componente ou placa contaminados; componente com dimensões erradas; componente com terminais não coplanares; placa de circuito impresso empenada.
- Defeitos na inserção: são defeitos gerados durante a inserção dos componentes na placa. Estes defeitos podem ser causados tanto em operações manuais, por exemplo: uma distração do operador, como em operações automáticas, devido a erros de programação ou variações da máquina. Os tipos de defeitos que podem ocorrer numa operação de inserção são: componente faltando; componente invertido; componente incorreto; componente desalinhado (somente componentes SMT); *tombstone* (componente SMT fica suspenso num lado da ilha).
- Defeitos nas terminações: são defeitos gerados durante o processo de soldagem, a causa destes defeitos podem estar relacionados com vários fatores, como por exemplo: aplicação de pasta de solda, parâmetros da máquina de solda por onda, orientação e espaçamento dos componentes na placas. Os tipos de defeitos que podem ocorrer entre os terminais do

componente e a placa são: curto (ligação indesejável entre dois ou mais pontos que não deveriam estar conectados); excesso de solda; ausência ou insuficiência de solda; soldagem deficiente; estalactite (projeção ou saliência de solda); *solder balls* (pequenas partículas de solda com vários formatos), *voids* (buracos nas juntas de solda).

Qualquer um destes defeitos irá resultar em alguma limitação na performance do produto. Existem defeitos (falta de componente, curto) que impedem diretamente a funcionalidade da placa, enquanto outros (insuficiência de solda, excesso de solda) poderão permitir uma funcionalidade total durante a fase de testes, porém mais adiante, quando a placa for transportada ou usada, estes defeitos podem tornar o produto não funcional.

A ocorrência dos diferentes tipos de defeitos não se dá na mesma proporção, sendo dependente dos processos, materiais e componentes utilizados. A Figura 16 ilustra uma típica distribuição de defeitos nas duas tecnologias de placa.

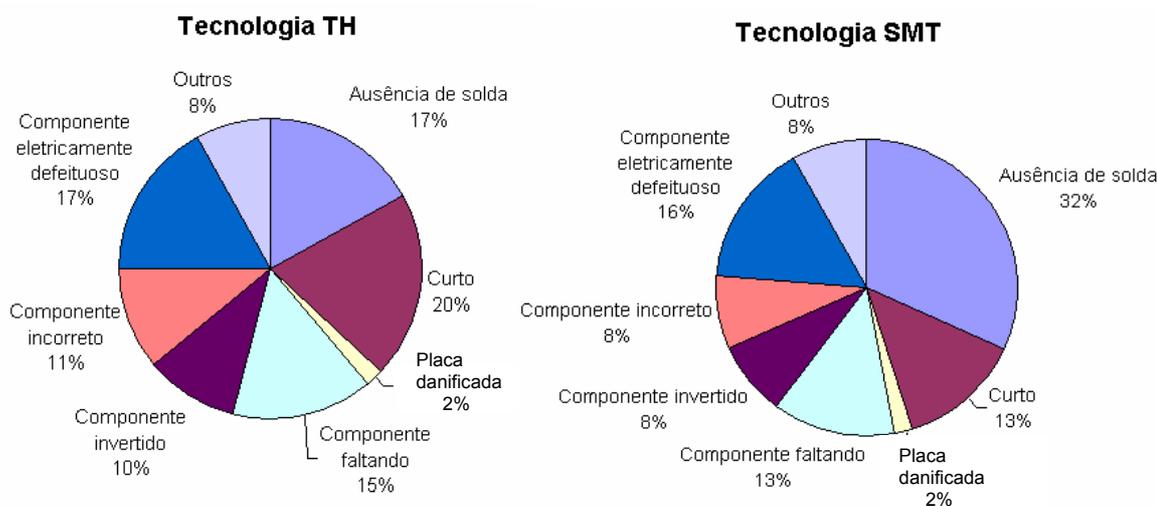


Figura 16 - Distribuição de defeitos nas tecnologias TH e SMT [23], [24],[25]

Os gráficos ilustrados na Figura 16 mostram uma diferença na distribuição de defeitos da tecnologia SMT em relação à tecnologia TH, isto ocorre devido o defeito “ausência de solda” nas juntas dos componentes SMT. Enquanto que no passado, com as placas totalmente compostas pela tecnologia TH, o defeito que prevalecia era o curto, hoje, com placas de tecnologia mista e totalmente SMT, o defeito que mais ocorre é a ausência ou insuficiência de solda.

No entanto, em ambos os casos pode-se notar que o processo de montagem das placas de circuito impresso é o que mais contribui para geração de defeitos na manufatura de um produto eletrônico. Para prevenir ou corrigir defeitos, requer-se de um conhecimento conclusivo das relações de causa e efeito do processo de montagem. No processo de montagem SMT, estima-se que 60% dos defeitos são originários da etapa de deposição de pasta de solda ^[26]. Já nos processos de montagem TH foi verificado que mais de 50% dos defeitos são causados pela máquina de solda por onda ^[24]. O formato dos terminais e a geometria dos componentes influem bastante na ocorrência de certos tipos de defeitos na montagem. Por exemplo, para os componentes do tipo *fine pitch* de terminais *J-lead* o defeito dominante é a ausência de solda, seguido pela insuficiência de solda e curto, enquanto que para os componentes do tipo BGA o defeito que mais ocorre é a insuficiência de solda seguido pelo *void* ^[24].

2.5 SÍNTESE

Os processos de montagem de placa de circuito impresso e os tipos de placas e de componentes foram apontadas neste capítulo. Em suma, das duas tecnologias de montagem existentes atualmente, a tecnologia SMT oferece uma melhor performance e uma redução no tamanho dos componentes se comparada com a tecnologia TH. Além disso, o processo de montagem SMT é mais veloz e totalmente automatizado.

Entretanto, em ambas as tecnologias, grandes são as oportunidades de surgirem defeitos nas placas de circuito impresso. Conhecer os tipos, as causas e as conseqüências destes defeitos é fundamental para que se consiga garantir a qualidade do produto.

3 GARANTIA DA QUALIDADE NA MONTAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Os métodos de garantia da qualidade que são pertinentes ao processo de montagem de placas de circuito impresso são apresentados neste capítulo. A estrutura adotada para esta apresentação seguiu o modelo proposto por Pfeifer ^[27], que associa ações e ferramentas da garantia da qualidade às diferentes etapas necessárias, partindo do desenvolvimento do produto, para fornecer um produto de qualidade ao cliente. Adaptando este modelo para o processo de montagem de placas de circuito impresso, têm-se três etapas principais onde os métodos de garantia de qualidade devem ser aplicados: no desenvolvimento do produto, no desenvolvimento e planejamento do processo e na produção (Figura 17).

Os métodos de garantia da qualidade aplicados no desenvolvimento do produto e no desenvolvimento e planejamento do processo, também conhecidos de métodos *off-line*, são dirigidos para a prevenção de erros, reduzindo a variabilidade e aumentando a robustez do produto e do processo. Os métodos aplicados no processo produtivo, os chamados métodos *on-line*, são usados para manter o processo dentro de uma específica área de variabilidade. Cabe ressaltar que os dados obtidos pela aplicação dos métodos *on-line* devem realimentar os métodos *off-line*, através de uma base viva de informações, que deve ser continuamente atualizada. A Figura 17 ilustra o enlace entre os métodos de garantia da qualidade aplicados para o processo de montagem de placas de circuito impresso.

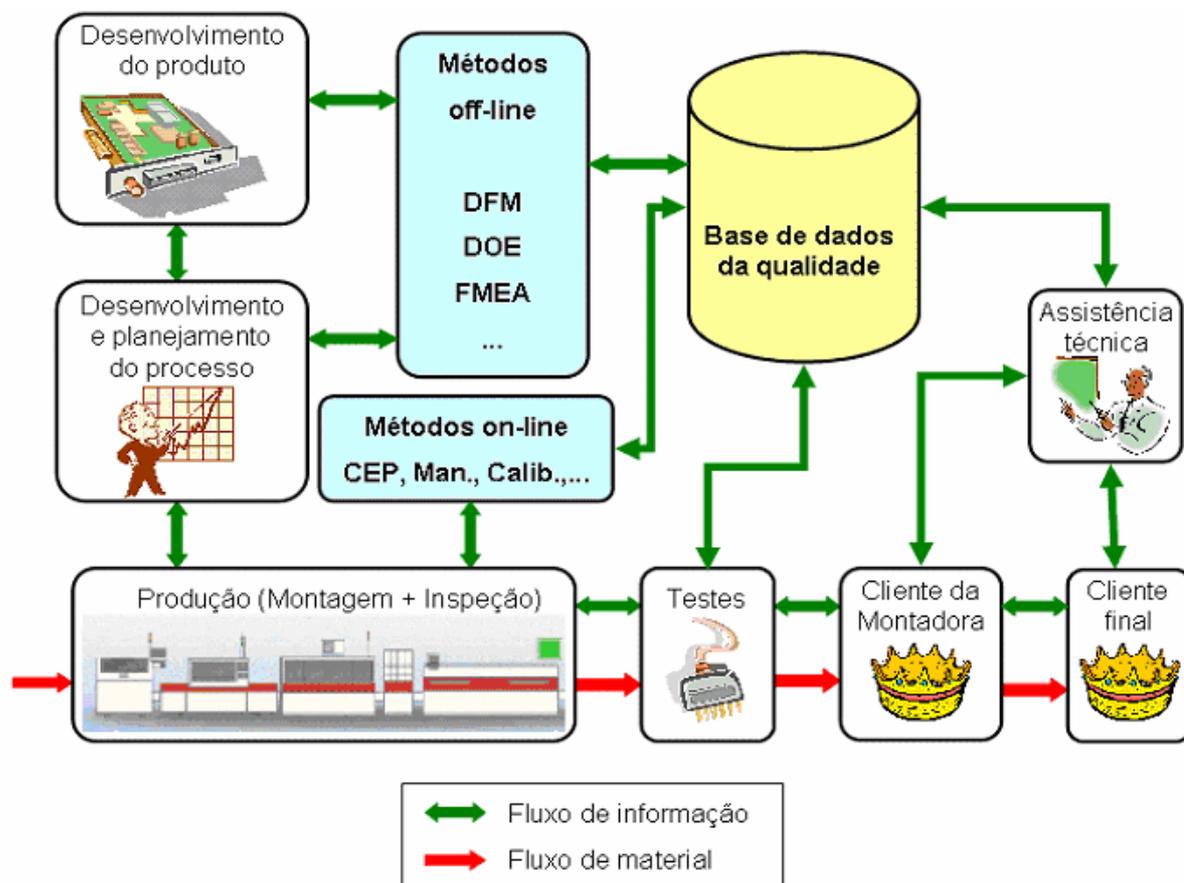


Figura 17 - Enlace entre os métodos de garantia da qualidade no processo de montagem de placas de circuito impresso (adaptado de [27])

Também são abordadas as principais técnicas de inspeções e testes usadas no processo montagem de placas de circuito impresso. As inspeções e os testes são usados para detectar defeitos nas placas, porém, dependendo de características como volume da produção, complexidade da placa, tipos de componentes utilizados, algumas técnicas são mais eficazes que outras. Selecionar a técnica de inspeção e teste apropriada e permitir que os dados obtidos nestas operações possam ser analisados é essencial para a eficácia do sistema de garantia da qualidade.

3.1 GARANTIA DA QUALIDADE NO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

O projeto de um produto não deve atingir somente os requisitos de performance, mas também minimizar os defeitos e os custos de manufatura e intensificar a qualidade e a confiabilidade. Para tanto, são usados métodos preventivos durante o desenvolvimento do produto a fim de assegurar que a placa de circuito impresso possa ser manufaturada, testada e reparada eficientemente. Estes métodos são descritos a seguir.

3.1.1 Projeto para manufaturabilidade (DFM)

Na indústria eletrônica iniciou-se, há mais de dez anos, um conceito conhecido como projeto para excelência. O projeto para excelência é uma metodologia que envolve vários setores da empresa, tais como: *design*, *layout*, engenharias de produção, de testes e de componentes, compras e *marketing*, com o objetivo de focar, concorrentemente, no projeto e manufatura de um produto ^[28].

O projeto para manufaturabilidade é a principal prática contida dentro deste conceito. Os princípios do DFM são usados na indústria através de diretrizes de projeto, que orientam o projetista durante o desenvolvimento do produto e por sistemas que medem a eficiência do projeto para a manufatura e custos ^[29].

O documento de diretrizes de projeto deverá conter no mínimo os seguintes tópicos: ^{[18],[30],[31]}

- critério de seleção de componentes;
- requisitos de orientação de componentes;
- requisitos de espaçamento de componentes;
- convenção de nomes e símbolos;
- requisitos de forma e tamanho da placa de circuito impresso;
- requisitos para corte de painéis de placa de circuito impresso;
- padrões de ilhas e *pads*;
- requisitos de forma, tamanho e espaçamento de trilhas;

- requisitos de área livre para movimentação da placa na linha (esteiras, *pallets*) e para marcação de rastreabilidade;
- requisitos máscara de solda e *silk-screen*;
- requisitos de fiduciais e furos de guia;
- considerações de processo (pasta de solda, inserção, refusão, máquina de solda);
- considerações de ambiente (temperatura, umidade).

Alguns benefícios do uso do DFM são: melhoria na qualidade, redução do tempo de lançamento do produto no mercado, *set-ups* melhores, diminuição de custos de materiais e produção, aumento na eficiência da linha e menos interações no *design* ^[32].

3.1.2 Projeto para testabilidade (DFT)

O projeto para testabilidade é um conjunto de regras e métodos aplicados durante o desenvolvimento do produto que irá adicionar uma estrutura física na placa, o que tornará possível executar um teste na produção com alta qualidade. Além disso, o DFT deve promover um bom rendimento no diagnóstico para minimizar o tempo e o custo dos testes, bem como reduzir o refugo.

Para verificar a funcionalidade de uma placa é ideal ter acesso a todos os pontos (nós) da placa de circuito impresso. Contudo, por várias razões incluindo performance da placa, tamanho do produto e uso de pacotes de componentes, tal como BGA, o total acesso elétrico não se tem tornado possível.

Desta forma, testar placas de circuito impresso hoje exige dos projetistas dispor a máxima “testabilidade” possível e criar uma efetiva estratégia de teste em torno da placa. Os engenheiros de teste devem examinar o espectro de defeitos e escolher a estratégia de teste ideal para encontrar cada classe de defeitos. Isso deve acontecer durante o projeto da placa, no escopo da engenharia concorrente ou simultânea ^[33].

3.2 GARANTIA DA QUALIDADE NO DESENVOLVIMENTO E PLANEJAMENTO DO PROCESSO

Durante a fase de desenvolvimento e planejamento do processo deseja-se criar processos robustos que minimizem as oportunidades de gerar defeitos, reduzindo assim a quantidade de inspeção. Entretanto, para que este objetivo seja alcançado é necessário que exista um esforço contínuo e a utilização de métodos consistentes. Nesta fase, um conjunto de métodos de garantia da qualidade é utilizado para analisar o processo, melhorar o desempenho do processo e prevenir erros.

3.2.1 Fluxograma

O fluxograma é um método para descrever graficamente um processo existente, ou um novo processo proposto, usando símbolos simples, linhas e palavras, de forma a apresentar graficamente as atividades e a seqüência no processo. O objetivo do fluxograma é adquirir conhecimento sobre o processo, para definir e implementar processos de aperfeiçoamento ^[34].

As informações contidas nos fluxogramas serão usadas para elaboração do PFMEA e plano de controle, podendo também ser usadas como ferramenta de treinamento e base para *brainstorming* ^{1 [29],[35]}.

3.2.2 Diagrama de Pareto

O princípio de Pareto é aplicado para num processo de manufatura para focar nas prováveis causas de defeitos, bem como priorizá-las ^[36].

O diagrama de Pareto é geralmente construído por tipos de defeitos ou por causas de defeitos. Sua construção é feita através de um diagrama de barras, onde os dados, agrupados de acordo com os aspectos mais significativos, são dispostos em ordem decrescente. A Figura 18 ilustra um diagrama de Pareto usado para analisar os defeitos encontrados durante a inspeção das placas de circuito impresso.

¹ **Brainstorming** (tempestade cerebral) - Procedimento utilizado para auxiliar um grupo a criar o máximo de idéias no menor tempo possível.

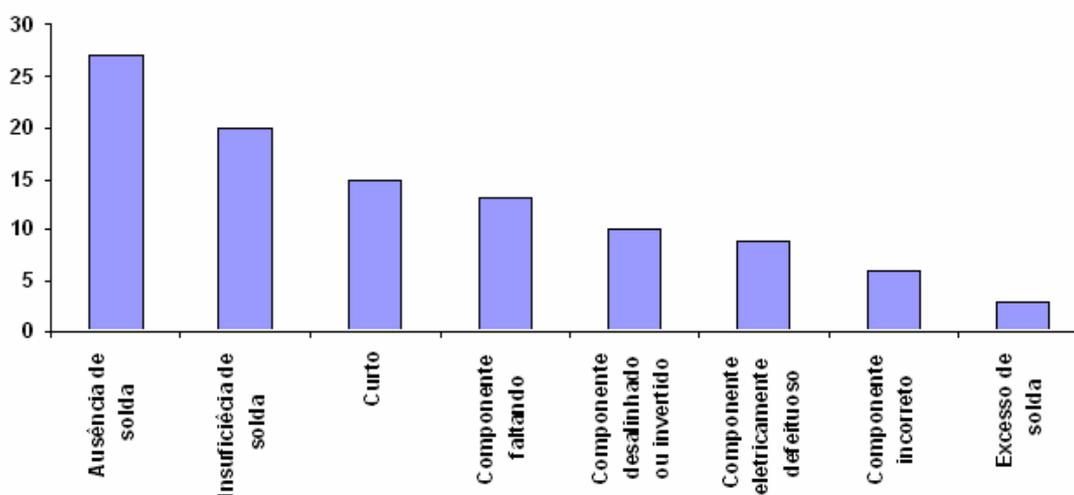


Figura 18 - Diagrama de Pareto dos defeitos encontrados na montagem de placas de circuito impresso ^[23].

No diagrama da figura fica claro que a ausência e a insuficiência de solda são responsáveis por quase 50% dos problemas da qualidade. Reduzindo esses dois tipos de defeitos será alcançada uma expressiva melhoria da qualidade.

3.2.3 Diagrama de causa-efeito

O diagrama de causa-efeito, também conhecido como diagrama de Ishikawa ou diagrama de espinha de peixe, é um diagrama que mostra a relação entre uma característica de qualidade (efeito) e os fatores (causas) que a influenciam. Ressalta-se que o número de fatores pode ser muito elevado, quando se analisa um processo, por isso geralmente divide-se-o em famílias de causas, que são os chamados 7 M's: material, máquinas, medidas, meio-ambiente, mão-de-obra, método e manutenção. Contudo não há uma regra para a quantidade e a definição destas categorias.

Na construção do diagrama de causa-efeito devem-se seguir os seguintes passos ^[36]:

- estabeleça o efeito (característica) da qualidade;
- encontre o maior número possível de causas que podam afetar o efeito da qualidade;

- defina as relações entre as causas e construa um diagrama de causa e efeito, ligando os elementos com o efeito da qualidade por relações de causa e efeito;
- estipule uma importância para cada causa e assinale as causas particularmente importantes, que pareçam ter um efeito significativo na característica da qualidade;
- registre quaisquer informações necessárias.

A Figura 19 ilustra um diagrama de causa-efeito utilizado para estudar os defeitos gerados pela máquina de solda por onda.

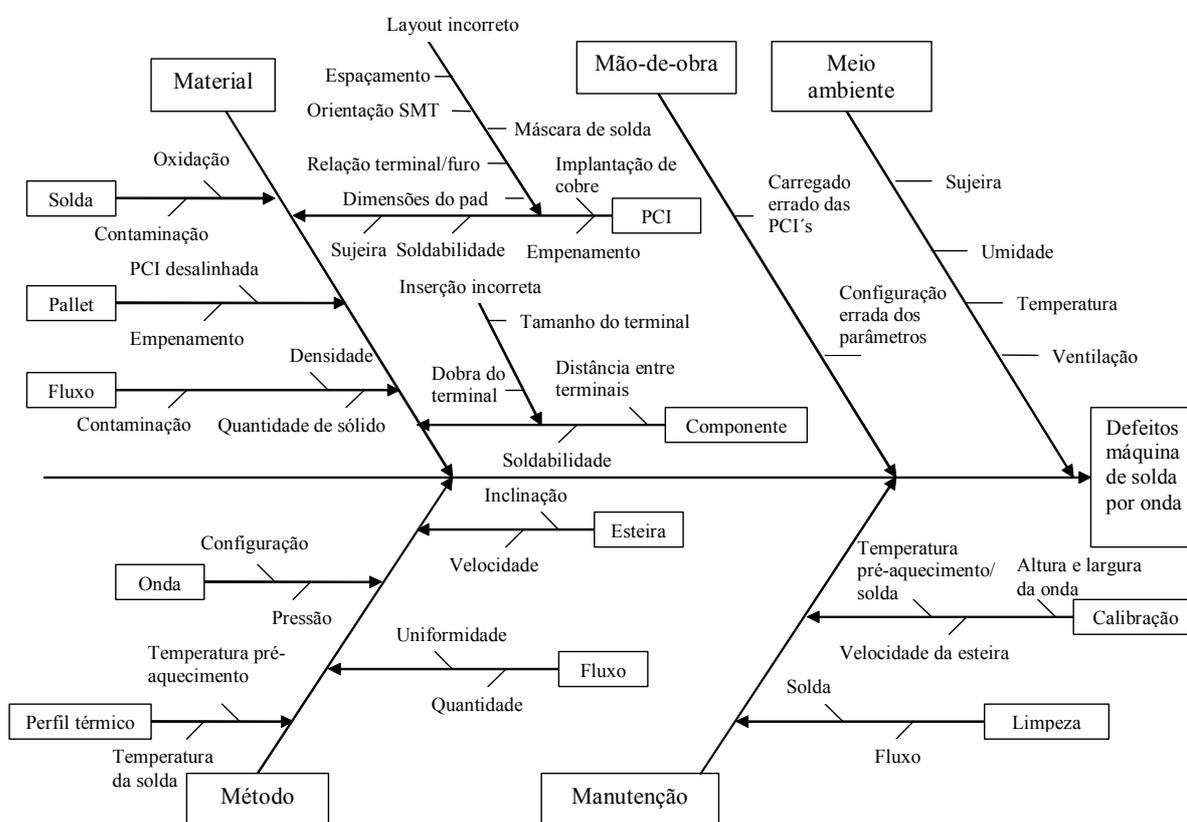


Figura 19 - Diagrama de causa-efeito para máquina de solda por onda

As principais aplicações deste diagrama são: no delineamento de experimentos (DOE), no controle do processo e no treinamento de novos funcionários, sendo também de grande utilidade no desenvolvimento do plano de reação.

3.2.4 Análise dos modos de falhas do processo e seus efeitos (PFMEA)

O PFMEA é uma técnica utilizada pela equipe de desenvolvimento de processo como um meio de assegurar que os modos potenciais de falha e seus respectivos efeitos e causas serão considerados e suficientemente discutidos. O PFMEA inclui a análise de todos os itens que podem dar errado no processo, baseado na experiência acumulada pela equipe responsável pelo desenvolvimento e operação do processo. O PFMEA deve ser usado como um documento vivo, sendo atualizado cada vez que existam alterações no processo.

Alguns benefícios do uso desta técnica são: identificar os modos de falha no processo que podem afetar a qualidade e a confiabilidade do produto; identificar o efeito dos modos de falha sobre o cliente; identificar as causas responsáveis pelos modos de falha que podem surgir na montagem ou manufatura; identificar os parâmetros do processo a serem controlados para reduzir ou eliminar as falhas; documentar os resultados do estudo, facilitando análises futuras do processo de manufatura ou montagem ^[37].

O PFMEA utiliza uma planilha padrão (Figura 20) para facilitar e tornar mais objetivo o estudo.

Operação/ Propósito	Modo potencial de falha	Efeito potencial da falha	Severidade	Causa potencial da falha	Ocorrência	Controles atuais	Detecção	Risco	Ação recomendada	Responsável	Ação efetuada	Resultados das Ações			
												Severidade	Ocorrência	Detecção	Risco Resultante
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)				(13)

Figura 20 – Planilha para elaboração do PFMEA ^[37]

Os campos da planilha são preenchidos da seguinte forma ^[37]:

1. Operação/Propósito – uma descrição simples de cada operação a ser analisada e o propósito da operação em análise. Se a operação envolver

diversas etapas, com modos potenciais de falhas diferentes, estas devem ser listadas separadamente.

2. Modo potencial de falha – trata-se de uma descrição de uma possível falha ou não conformidade associada com a operação em estudo.
3. Efeito potencial de falha – é a consequência dos modos potenciais de falha, conforme percebidos pelo cliente. A descrição deve ser feita em função daquilo que o cliente poderá observar ou experimentar.
4. Severidade – é o impacto que o efeito do modo potencial de falha tem sobre a operação do sistema e, por conseguinte, sobre a satisfação do cliente. A severidade é estimada através de uma escala de 1 (mínima) a 10 (muito alta).
5. Causa Potencial da Falha – é uma das etapas mais importantes do PFMEA, onde se busca identificar a origem do modo potencial de falha. Para cumprir com sucesso essa etapa é necessário que a equipe tenha conhecimento técnico sobre o processo em estudo.
6. Ocorrência – está relacionada com a frequência em que ocorrem as causas (mecanismos de falha listados na coluna anterior). A avaliação é feita em uma escala de 1 (mínima) a 10 (muito alta).
7. Controles atuais – nesta coluna devem ser descritos os controles incorporados no processo que podem impedir ou detectar um modo de falha.
8. Detecção – aqui se busca fazer uma estimativa da habilidade dos controles atuais em detectar modos potenciais de falha em consideração. Também é usada uma escala de 1 a 10, onde 1 representa uma situação favorável (modo de falha será detectado) e 10 representa uma situação desfavorável.
9. Risco – é calculado para priorizar as ações de correção/melhoria. O cálculo do risco é feito a partir do produto entre Severidade, Ocorrência e Detecção.
10. Ação recomendada – a intenção das ações recomendadas deve ser reduzir a Severidade, Ocorrência e Detecção. Uma vez que os modos de falha tenham sido priorizados através do Risco, as ações recomendadas devem se dirigir aos itens de maior Risco. Em geral, considera-se que os Riscos maiores ou iguais a 50 devem ser objeto de ações de melhoria.

11. Responsável – indica-se o grupo ou indivíduo responsável pela ação recomendada.
12. Ação efetuada – breve descrição das ações de correções e melhorias efetivamente implantadas.
13. Risco resultante – depois que ações corretivas tiverem sido identificadas, mas antes de serem efetuadas, faz-se uma estimativa futura para Severidade, Ocorrência e Detecção. Se nenhuma ação é prevista, essas últimas colunas permanecem em branco.

No entanto, a confecção do PFMEA exige primeiramente levantar e registrar todas as características do processo. É necessário conhecer as funções de todas as partes do processo, as falhas relevantes para estas partes, as causas e conseqüências das falhas. O mínimo de informações de entrada para elaboração do PFMEA inclui ^[38]:

- fluxograma do processo ou diagrama de bloco funcional;
- especificações e requisitos do cliente;
- resultados de testes;
- resultados quantitativos de análises (DOE, CEP, indicadores);
- dados de falha e retrabalho;
- dados sobre processo similares.

Além disso, é necessário que envolva direta e ativamente representantes de todas as áreas. Devem ser avaliados produtos finais, subsistemas, componentes e sistemas relacionados, de tal maneira que as falhas potenciais sejam descritas e entendidas.

3.2.5 Delineamento de experimentos (DOE)

O delineamento de experimentos é uma sistemática para planejar um experimento, onde as entradas (ou fatores ou variáveis) são alteradas de modo planejado para avaliar seu impacto sobre uma saída (ou resposta) ^[34].

O DOE tem muitas aplicações no processo de montagem de placas de circuito impresso. As principais são ^[36]:

- Estudo de caracterização do equipamento – usado para determinar quais são as variáveis mais importantes para controlar o funcionamento de uma máquina ou equipamento. Este conhecimento do processo é vital para o sucesso do CEP na prática, indicando quais parâmetros têm a necessidade de ajuste, quando um processo está fora de controle.
- Estudo de otimização do equipamento – usado na configuração dos parâmetros da máquina que podem otimizar o rendimento ou reduzir o número de defeitos no produto. Por exemplo: configuração dos parâmetros da máquina de solda por onda para redução de defeitos ^{[29],[39]} e otimização do processo de aplicação de pasta de solda ^[29].
- Avaliação de materiais – usada para avaliar os melhores tipos de materiais, tais como: pasta de solda, adesivo, fluxo, que podem ser usados no processo de montagem.

O delineamento de experimentos proporciona uma redução no tempo de desenvolvimento garantindo um maior detalhamento da informação. Depois de identificadas as condições do processo e os componentes do produto que influenciam na qualidade do produto, podem-se então direcionar esforços de melhoria para aumentar a qualidade, a confiabilidade e o desempenho da montagem.

Cabe ressaltar que para qualquer delineamento é necessário que o usuário do método conheça com profundidade o problema (sistema ou processo) que deseja estudar. Como os recursos são limitados, é muito importante obter o máximo de informações para cada experimento que é executado ^[40].

3.2.6 Plano de controle

O objetivo do plano de controle é auxiliar na fabricação de produtos de qualidade de acordo com os requisitos do cliente. Ele faz isso fornecendo um modelo estruturado dos métodos de controle que efetivamente adicionam valor para um processo produtivo, evitando a fabricação de produto não-conforme e reduzindo

a variação das características da qualidade de produto e processo. O plano de controle não substitui as instruções detalhadas do operador, mas serve como um guia geral a partir da qual as instruções são desdobradas ^{[35], [41]}.

A Figura 21 ilustra um formulário para elaboração do plano de controle que pode ser usado no processo de montagem de placas de circuito impresso.

Ponto de controle	Nome do processo/ Descrição da operação	Característico	Especificação	Técnica avaliação/ inspeção	Responsável	Tamanho da amostra	Frequência de amostragem	Método de controle	Reação
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)

Figura 21 – Formulário para elaboração do plano de controle

Os campos da planilha são preenchidos da seguinte forma ^{[35], [41]}:

1. Ponto de controle – o ponto/local do processo em que se realiza a inspeção ou teste, identificado por um número que permita localizá-lo no fluxograma do processo.
2. Nome do processo / Descrição da operação – nome ou descrição da tarefa que se realiza no ponto de controle.
3. Característico – pode ser um característico dos materiais ou insumos utilizados no produto e processo, um característico de produto ou um característico de processo.
4. Especificação – contém o valor nominal e a tolerância para cada característico de material, produto ou processo.
5. Técnica de avaliação / inspeção – método ou sistema usado para medir, inspecionar ou testar o característico a controlar.
6. Responsável – grupo ou indivíduo responsável pelo controle.

7. Tamanho da amostra – a quantidade de material ou produto retirado para realizar o controle.
8. Frequência de amostragem – tempo entre amostras sucessivas de material ou produto.
9. Método de controle – lista de forma concisa o método de controle usado para o característico do produto ou processo (por exemplo “controle estatístico de processo”).
10. Plano de reação – ação corretiva a ser tomada se fosse achado produto não conforme ou se o processo estiver fora de controle.

Desta forma, o plano de controle constitui uma lista ordenada das tarefas de controle da qualidade necessárias para garantir a qualidade do produto e do processo. Ele se estende desde a recepção de materiais até a embalagem do produto para ser remetido ao cliente. Caso haja necessidade, poderão ser construídos planos de controle para protótipo, para série piloto e para produção.

O plano de controle pode ser entendido como o documento de transferência entre a gestão preventiva da qualidade e a gestão da qualidade na linha de fabricação. Ele deve ser construído por uma equipe multidisciplinar, levando em conta a complexidade do produto, o fluxograma do processo, os resultados do FMEA de processos, o histórico de defeitos em produtos similares, os resultados de experimentos realizados sobre o processo, informações sobre inspeção e testes. Especialmente, o conhecimento das capacidades dos diferentes métodos de inspeção e testes é fundamental para gerar um plano de controle efetivo. Podem ser encontrados subsídios sobre este tema na seção 3.4 desta dissertação.

É praxe focar o plano de controle nos característicos especiais de produto e processo, ou seja, aqueles cuja falha pode acarretar perda de funcionalidade do produto, resultando em insatisfação do cliente, prejuízos econômicos e, eventualmente, danos a equipamentos e pessoas. Um plano de controle bem construído não especifica inspeções e testes desnecessários, senão somente aqueles que são imprescindíveis para garantir a qualidade do produto. A seguir alguns aspectos chave para o sucesso técnico e econômico de um plano de controle:

- seleção adequada dos pontos de controle – as inspeções e testes devem ser realizadas imediatamente após a operação que pode ter produzido a não-conformidade ou falha;
- foco no controle de processo, mais que na segregação de produto defeituoso;
- inspeções e testes realizados pelo próprio pessoal de processos, sempre que seja possível;
- sempre que possível utilizar dados obtidos por medição, minimizando o controle por atributos;

O plano de controle, tal como o FMEA, é um documento vivo do sistema de garantia de qualidade, que deve ser atualizado cada vez que se modifique alguma das condições de montagem.

3.2.7 Plano de reação

O plano de reação descreve os passos a serem tomados pelo operador quando o método de controle indicar problema. Um bom plano de reação deve incluir quatro elementos críticos ^[38]:

- Segregação – assim que o problema for identificado é necessário separar todos os produtos suspeitos. Pode-se também intensificar a inspeção até o problema ser resolvido.
- Diagnóstico – determinar a causa raiz da falha.
- Verificação – coletar amostras adicionais após a ação corretiva ser implantada, para verificar se os problemas foram solucionados.
- Disposição – dispor apropriadamente do material que foi segregado no primeiro passo do plano de reação (por exemplo, refugar, retrabalhar, manter como está ou retornar para o vendedor).

O plano de reação é um complemento indispensável do plano de controle.

3.2.8 Treinamentos

Uma das características de uma organização preocupada com a melhoria de produto e processo é a capacidade de aprendizagem, tanto do indivíduo, em grupos ou no nível organizacional. Uma vez que a tecnologia está disponível para todas as empresas, o que diferencia uma das outras é o conhecimento, pois a empresa que possui o conhecimento é capaz de ter o domínio sobre as demais frente às barreiras comerciais.

A aprendizagem organizacional, de acordo com Deming ^[42], gera e abrange dois tipos de conhecimento: do processo e profundo. O primeiro se refere ao conhecimento das tarefas do processo, completada com o entendimento técnico, humano e das tarefas necessárias para seguir as instruções operacionais. Este é necessário para entender as características do processo que produz e entrega produtos e serviços. O segundo, o profundo, compreende teorias de sistema, estatística, psicologia e teorias do conhecimento. Ele inclui os conhecimentos metodológicos necessários para conduzir o processo, examinando o que acontece na organização.

As normas ISO 9000 ^[43] e ISO/TS 16949 ^[44] têm requisitos específicos sobre treinamento, a fim de que a organização identifique as necessidades de treinamento e treine o pessoal para atender estas necessidades.

3.2.9 Procedimentos

Procedimento é uma forma especificada de executar uma atividade ou um processo ^[45].

A utilização de procedimentos é imprescindível durante o processo produtivo, pois permitem que todas as operações de processo sejam seguidas de forma padronizada. Uma vez que o procedimento contém as informações documentadas, isto irá evitar um desvio das informações ou que estas sejam passadas de forma incompleta.

3.3 GARANTIA DA QUALIDADE NA PRODUÇÃO

Na fase de produção o processo deve manter-se com um desempenho adequado e previsível. Para isto, diversas técnicas são utilizadas. Uma foca nos materiais, equipamentos e máquinas produtivas visando a prevenção de defeitos, enquanto outras focam diretamente no produto visando a correção dos problemas.

3.3.1 Controle estatístico de processo (CEP)

Introduzido por Walter A. Shewhart nos anos 30, o CEP (em inglês SPC - Statistical Process Control) consiste na aplicação de métodos estatísticos para analisar e controlar um processo ^[27].

Pode-se afirmar que qualquer processo apresenta variação, sendo que esta pode ser classificada segundo o comportamento das causas que a produzem. No controle estatístico de processos se distinguem quatro tipos de variação ^[46]:

- Variação por causas comuns – é o resultado da ação do sistema de causas do próprio processo, composto por várias causas que, por razões técnicas ou econômicas, não são individualizáveis. Esta é evidenciada por um padrão aleatório no gráfico de controle. Um processo sob a ação de causas comuns apresenta a menor variabilidade consistente com sua configuração.
- Variação estrutural ou intrínseca – é o efeito de causas que influenciam o processo numa forma marcada, mas previsível. Esta é evidenciada por padrões não aleatórios. É técnica e economicamente viável identificar as causas de variação estrutural, mas para eliminá-las é necessário mudar o processo.
- Variação por causas especiais – resulta da intervenção de causas alheias ao processo, sendo evidenciada por padrões aleatórios no gráfico de controle. É técnica e economicamente viável identificar e eliminar as causas especiais.
- Sobre-ajuste – é o ajuste de um processo para compensar variações que são devidas a causas comuns. O sobre-ajuste produz sempre um aumento da variabilidade.

Um processo é dito sob controle quando sua variação deve-se somente a causas comuns. Processos sob controle apresentam um comportamento previsível. Por isso, deve-se trabalhar continuamente para eliminar as causas especiais e estruturais, evitando o sobre-ajuste.

O gráfico de controle é a principal ferramenta empregada no controle estatístico do processo. Um gráfico de controle é um conjunto de pontos, ordenados no tempo, que são interpretados em função de linhas horizontais, chamadas de limite superior de controle, linha média e limite inferior de controle ^[34]. A Figura 22 apresenta um exemplo de gráfico de controle típico.

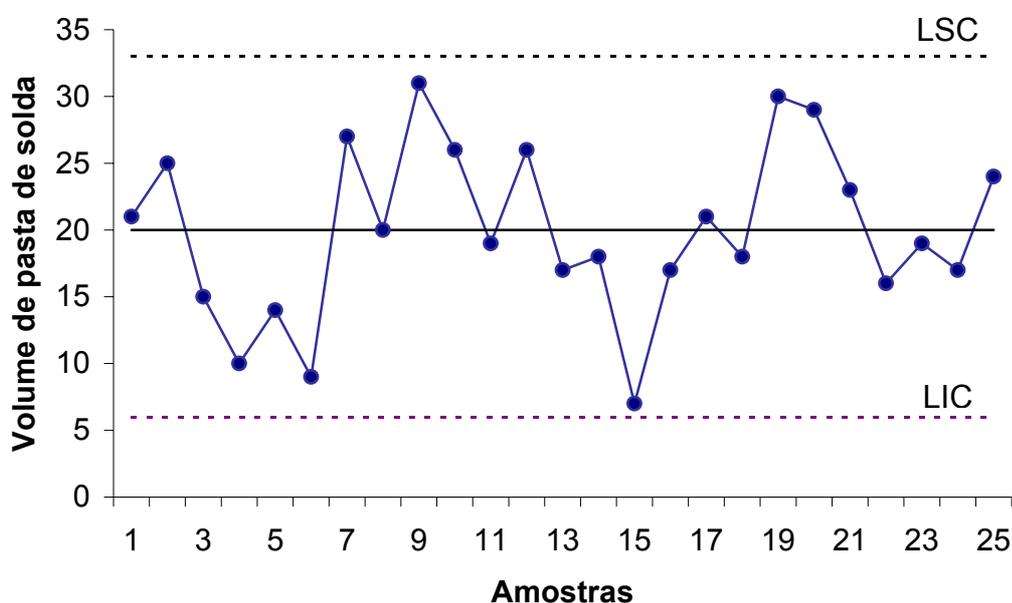


Figura 22 - Gráfico de controle - ferramenta usada no controle estatístico do processo

O gráfico de controle permite diferenciar o sinal produzido por uma causa especial do ruído gerado pelo sistema de causas comuns. Assim, podem-se realizar correções quando são necessárias, evitando o sobre-ajuste. Adequadamente assistida por um registro sistemático das condições de operação, o gráfico de controle fornece a informação necessária para manter o processo sob controle estatístico e conhecer o sistema de causas do processo. A partir deste conhecimento, com auxílio de outras ferramentas da qualidade, será possível agir sobre essas causas na busca da diminuição da variabilidade ^[47].

Existem duas grandes categorias de gráficos de controle:

- Gráficos de controle por variáveis – usadas quando o valor é resultado de algum tipo de medição (peso, tempo, calor, comprimento, resistência).
- Gráficos de controle por atributos – usadas quando o valor é resultado decorrente de uma classificação ou contagem (número de defeituosos, número de defeitos, número de erros).

No processo de montagem de placas de circuito impresso os gráficos de controle por variáveis são usadas para controlar os parâmetros de processo e as características dos materiais, como por exemplo: temperatura do forno de refusão e viscosidade da pasta de solda. Neste caso, os gráficos de controle têm função de prevenir defeitos. Já os gráficos de controle por atributos são aplicados para acompanhar o número de defeitos no produto, indicando se o nível de defeitos encontra-se sob controle.

3.3.2 Manutenção

A manutenção consiste no conjunto de técnicas que permitem conservar ou restabelecer a máxima funcionalidade, exatidão e disponibilidade de um equipamento produtivo, serviço ou produto, em condições econômicas ótimas.

Os tipos de manutenção mais utilizados são ^[27]:

- Manutenção corretiva – consiste em restabelecer o estado de funcionamento das máquinas, equipamentos e instalações quando estiverem danificados. Esta é imprevisível e implica perdas e custos extras na produção.
- Manutenção preventiva – consiste em realizar intervenções ou troca de componentes da máquina a cada período de tempo ou número de unidades de uso. Tem a vantagem de poder planejar as intervenções e realizá-las em período de baixa produção, ou quando menos influenciar a mesma. Seus custos são previsíveis e avaliáveis.
- Manutenção preditiva – baseia-se no conhecimento do estado das máquinas, medindo ou examinando certos parâmetros característicos da mesma (vibrações, temperatura, análise de óleos) sem a necessidade de parada. Estes parâmetros indicam o estado real do funcionamento das máquinas e o

instante previsível da quebra. Assim, é possível programar as intervenções antes da falha ocorrer, evitando a substituição desnecessária de peças.

A tendência atual é no sentido de priorizar a manutenção preditiva, por ser a que resulta em custos globais menores e numa maior produtividade do processo.

Cabe destacar que o sistema de garantia da qualidade tem uma estreita relação bidirecional com a gestão da manutenção. Máquinas em bom estado de manutenção é um pré-requisito para trabalhar com processos sob controle que operem com variabilidade reduzida. Reciprocamente, técnicas da garantia da qualidade, tal como o CEP, quando aplicadas racionalmente, permitem identificar condições não ideais de operação de equipamento antes que se produzam falhas catastróficas.

3.3.3 Diário de bordo

O diário de bordo é um relato de qualquer modificação ou correção por causa especial que ocorre no produto ou processo. O diário de bordo deve conter informações como: alterações ocorridas, motivo das causas especiais, ações tomadas para solucionar os problemas. Nas informações devem estar indicados a data, a hora, o nome do operador e o código do produto que estava sendo produzido no momento que o evento ocorreu. Os relatos feitos no diário de bordo servem para criar um histórico do que possa ser correlacionado com a evidência estatística, descrevendo a qualidade do produto e o andamento do processo. Sem esse histórico, a identificação das causas de estados indesejáveis torna-se muito difícil.

3.3.4 Rastreabilidade

Rastreabilidade é a capacidade de recuperação do histórico, da aplicação ou da localização de uma entidade, por meio de identificações registradas^[48].

No processo produtivo a rastreabilidade pode ter dois enfoques principais:

- Rastreabilidade do produto – através da identificação unívoca de cada unidade produzida é possível conhecer a origem dos materiais e dos componentes, o histórico do produto, a composição do produto e a distribuição e localização do produto depois da entrega.

- Rastreabilidade na coleta de dados – permite relacionar os cálculos e os dados gerados em todo o ciclo da qualidade, remontando, às vezes, aos requisitos para a qualidade de uma entidade. Esta deve ser capaz de correlacionar no tempo todas as informações geradas pelo CEP, diário de bordo, manutenção, inspeção, testes.

A rastreabilidade é um elemento essencial na garantia da qualidade de placas de circuito impresso. Apesar disso, pequenos fabricantes de produtos eletrônicos não a praticam, impossibilitando assim qualquer tipo de melhoria da qualidade.

3.4 INSPEÇÃO E TESTE

As inspeções e os testes são usados na linha de produção para verificar se a placa de circuito impresso está conforme as especificações desejadas. As características das principais técnicas de inspeção e teste utilizadas no processo de montagem de placas de circuito impresso serão descritas a seguir.

3.4.1 Inspeção

O principal propósito da inspeção é determinar se o produto está conforme as especificações. Contudo, existem outros propósitos para a inspeção, sendo os mais importantes: distinguir lotes bons de lotes ruins, distinguir indivíduos de produto bons de indivíduos ruins, determinar se o processo está variando, determinar se o processo está dentro dos limites de especificação, avaliar a capacidade do processo, avaliar a eficiência dos inspetores da qualidade, avaliar um instrumento de medição [48].

O planejamento da inspeção é realizado durante a elaboração do plano de controle. Na indústria de montagem de placas, as três principais instâncias onde deve ocorrer a inspeção são [49].

- Inspeção na entrada – é executada nas partes que irão compor o produto, ou seja, placa de circuito impresso nua, insumos (pasta de solda, adesivo, fluxo) e componentes. Esta inspeção serve para verificar se as partes encontram-se

dentro das especificações. Com isto, é possível avaliar os fornecedores e conhecer se o problema está nos materiais ou no processo de montagem ^[50].

- Inspeção no processo – é necessária para identificar os defeitos de montagem. Os principais pontos de inspeção no processo SMT são: após a aplicação de pasta de solda, após a inserção de componentes e após o forno de refusão. Enquanto que no processo TH, a inspeção deve ocorrer antes e após a máquina de solda por onda ^[51].
- Inspeção na saída – consiste em uma inspeção final feita na placa de circuito impresso, após todas as etapas serem concluídas ^[49].

As principais técnicas de inspeção usadas no processo de montagem de placas de circuito impresso são: inspeção visual manual, inspeção óptica automática e inspeção raio-X.

3.4.1.1 Inspeção visual manual (MVI) ou inspeção humana

O ser humano é sem dúvida o mais flexível e inteligente de todos os sistemas de inspeção. Este possui habilidade de lembrar de vários detalhes dos critérios de inspeção, perceber detalhes de cor e geometria e interpretar novas e imprevistas circunstâncias, que são difíceis de serem alcançadas com qualquer tecnologia de software e hardware atualmente. Contudo, o elemento humano em um processo de inspeção contribui significativamente para a geração de erros de inspeção. Os erros de inspeção são de várias categorias ^[48]: erros técnicos (falta de capacidade para o cargo, falta de treinamento), erros por inadvertência (distração, descuido, tédio) e erros conscientes (fraude). Para minimizar os erros de inspeção é necessário um programa de treinamento e conscientização para os operadores (ou inspetores) e a utilização de especificações de manufatura (padrões com as definições de critérios de bom/ruim ou aceitável/não-aceitável) ^[49]. Padrões fotográficos são especialmente úteis na montagem de placas de circuito impresso.

As ferramentas que auxiliam na inspeção visual manual variam de uma simples lente de aumento até um microscópio de projeção, sendo que, para uma inspeção geral, um aumento de três a dez vezes é suficiente. Uma boa iluminação é necessária para realçar a junta de solda. Por fim, o equipamento deve ser capaz de variar seu ângulo de visão para uma melhor inspeção das juntas de solda.

3.4.1.2 Inspeção óptica automática (AOI)

Esta técnica utiliza um sistema de coleta de imagem conectado em um computador para adquirir automaticamente uma imagem, gravá-la, e então, executar algum tipo de processamento, a fim de fazer uma avaliação em relação a um critério pré-definido. Estas máquinas possuem tecnologias para executarem inspeções na forma 2-D (duas dimensões) ou 3-D (três dimensões), sendo mais eficientes na inspeção 2-D.

Nos sistemas de inspeção 2-D o processo começa com a captura da imagem através de uma câmera CCD. Em seguida, o processador irá transformá-la em uma matriz de elementos de imagem, ou pixels. Para cada pixel é atribuído um valor analógico, dependendo da luminosidade. Este é então convertido num valor digital para mais adiante ser analisado ou gravado ^[49].

Os sistemas de inspeção 3D usam um sistema, geralmente de varredura laser, para criar a imagem da placa de circuito impresso de forma tridimensional. A imagem 3D é baseada na altura da superfície da placa e dos componentes. A Figura 23 ilustra o princípio de funcionamento das máquinas AOI ^[52].

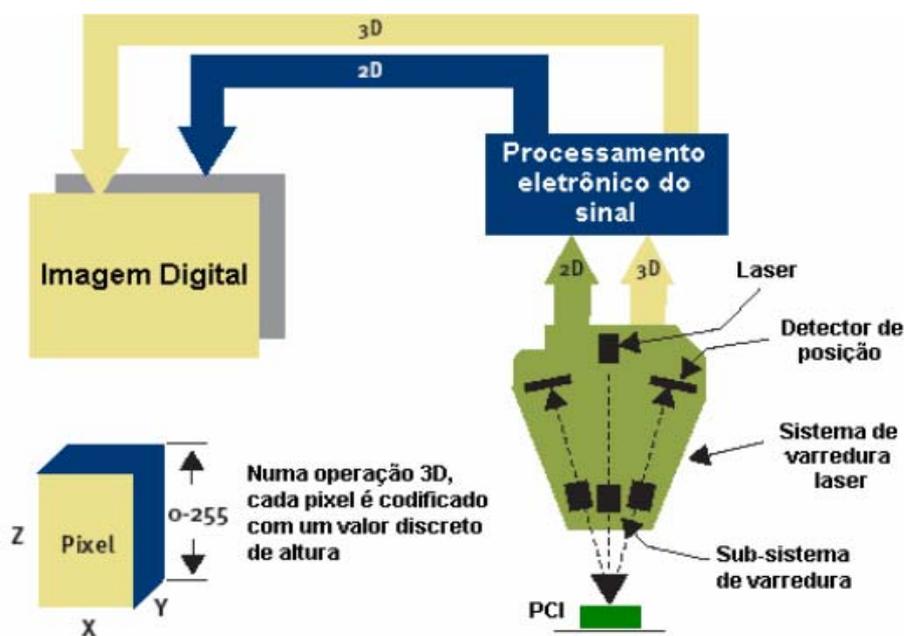


Figura 23 - Princípio de funcionamento das máquinas AOI ^[52]

O método de inspeção das máquinas AOI é a correlação ou técnica da comparação. A máquina faz uso de uma placa de circuito impresso de referência, também chamada de *golden board*, que é gravada em memória. Desta forma, cada ponto da placa de circuito impresso sob teste é comparado com esta placa padrão, pixel a pixel, para determinar se existe algum possível defeito ^{[49],[51]}.

A principal característica destas máquinas é seu alto rendimento, permitindo executar a inspeção completa de uma placa à velocidade da linha de produção, permitindo a identificação de defeitos de forma *on-line* ^{[49],[53]}.

3.4.1.3 Inspeção raio-X

O uso industrial do raio-X para testes não destrutivos é baseado no princípio de absorção da penetração da radiação. Durante a inspeção, a radiação emitida da fonte passa através da placa de circuito impresso (Figura 24), sendo parcialmente absorvida pelo detector (materiais de diferentes espessuras e densidades irão absorver radiação em diferentes quantidades). O detector por sua vez direciona a imagem, através de um espelho, para uma câmara de vídeo, onde a imagem é digitalizada e enviada ao processador de imagem, a fim de mostrar, ampliar e analisar a imagem ^{[49],[50]}.

Estas máquinas possuem sistemas de inspeção automático e manual, com tecnologia de visualização de imagem na forma 2-D e 3-D. Nos sistemas de inspeção manual, a avaliação dos defeitos é feita pelo operador através da observação da imagem. Já nos sistemas automáticos a imagem é examinada pixel a pixel pelo computador, que utiliza algoritmos apropriados para verificar se a quantidade e a localização dos materiais estão de acordo com o valores pré-determinados, sendo que esta análise é registrada em arquivos, onde é indicada a localização dos defeitos ^{[49],[50]}.

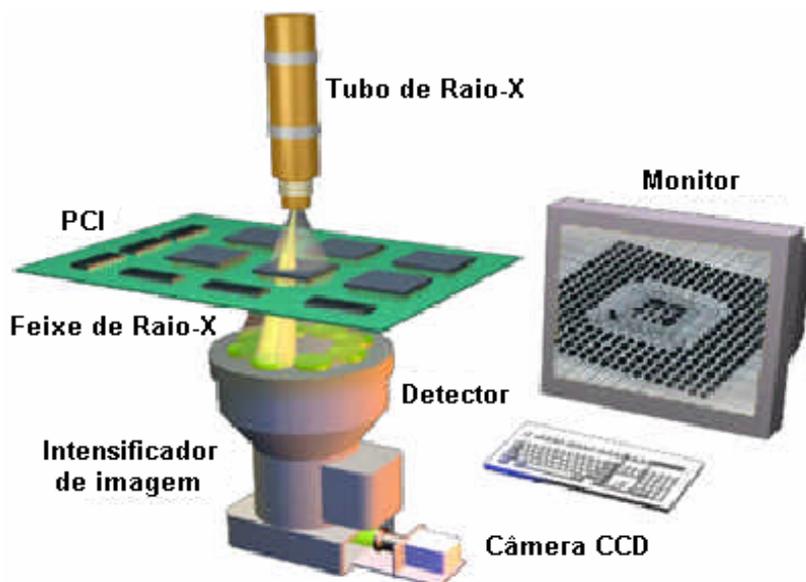


Figura 24 - Princípio de funcionamento das máquinas de inspeção por raio-X ^[50]

Devido a cada vez mais placas utilizarem pacotes de componentes *fine pitches* e BGAs, a necessidade para a inspeção em raio-X vem aumentando progressivamente. As juntas de solda dos componentes *fine pitches* com terminais *J-lead* são muito difíceis de serem inspecionadas, enquanto que as juntas de solda dos componentes BGAs são impossíveis de serem inspecionadas visualmente. Através do sistema de raio-X, é possível inspecionar ambos os tipos de juntas, além de inspecionar por *voids* (buracos dentro da juntas de solda), que nenhum outro método é capaz de detectar ^[49].

3.4.2 Teste

Os testes são necessários para identificar os defeitos na placa de circuito impresso não detectados pela inspeção, evitando assim que um produto não conforme seja entregue ao cliente. Além disso, os testes contêm informações úteis para ações preventivas ou corretivas como, por exemplo, selecionar um diferente componente ou fornecedor ^[49]. Na fabricação de placas de circuito impresso, os testes diferem da inspeção primeiramente pelo fato de utilizarem métodos elétricos no lugar de métodos ópticos. Outra grande diferença é que os testes são utilizados após o processo de montagem ser concluído ^[54].

Os principais tipos de testes elétricos em placas de circuito impresso são: testes de circuito e testes funcionais.

3.4.2.1 Teste de circuito ou in-circuit (ICT)

O ICT é uma técnica usada para verificar o comportamento dos componentes soldados na placa de circuito impresso através da transmissão de sinais de teste. O sistema tradicional utiliza uma “cama-de-pinos” para acessar simultaneamente múltiplos pontos por baixo da placa de circuito impresso^{[29],[54]}.

Uma outra forma de teste de circuito é o *flying prober* (ponta de prova flutuante), neste caso, o processo de teste elétrico é executado por cabeças de testes (tipicamente quatro ou oito) deslocando-se em alta velocidade através da placa de circuito impresso (Figura 25). Assim, a ponta de prova elétrica, localizada em cada cabeça de teste, faz o contato e testa os terminais dos componentes seqüencialmente^[54].

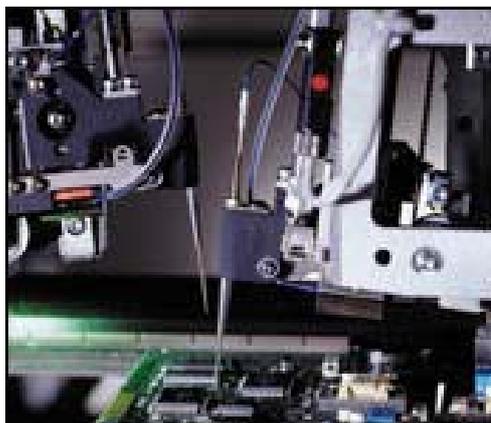


Figura 25 - *Flying prober* - Os pontos de contato são testados seqüencialmente^[54]

Muitas fontes de ruídos eletrônicos podem estar presentes nestes testes, tais como capacitâncias parasitas e resistências dos fios e contatos, além disso, alguns componentes no circuito são usados em paralelo com outros, dificultando testar um componente individualmente. Entretanto, o principal problema encontrado por esses sistemas atualmente é o acesso aos pontos de testes. Com os componentes tornando-se mais complexos e pacotes mais densos, o acesso aos pontos de testes diminui, impedindo de testar completamente o circuito^{[29],[54]}.

3.4.2.2 Teste funcional

O teste funcional, considerado a primeira geração de testes automáticos, pode ser usado para eliminar os defeitos de montagem e projeto, pois verifica o comportamento dinâmico do circuito^{[29],[55]}.

Empregado sempre no final da linha, o teste funcional determina se a placa de circuito impresso montada passou ou falhou. Tipicamente a interface entre o sistema e a placa sob teste é feita através de conectores, onde é simulado o ambiente elétrico final em que a placa será usada. A forma mais comum de teste funcional simplesmente verifica se a placa de circuito impresso está funcionando corretamente, sendo que os mais sofisticados envolvem a placa num ciclo de testes operacionais^[54].

Geralmente os testes funcionais não são flexíveis, sendo dedicados a aplicações individuais, além do mais, em alguns casos sua utilização pode danificar o circuito se os defeitos de montagem não forem anteriormente removidos. Porém, a principal dificuldade de implantar os testes está na complexidade e densidade da placa circuito impresso. Uma solução que está sendo criada é uma técnica chamada *Boundary Scan*. O conceito deste método é dado pelo padrão IEEE 1149.1^{[49],[54],[55]}.

Este padrão define uma porta serial de quatro fios, que permite ao sistema de teste acessar um ponto interno e inacessível do circuito eletrônico, utilizando para isto um circuito especial de conversão serial-paralela e um software dedicado. Desta forma, o teste é feito dividindo eletronicamente o circuito, e então, verifica-se cada seção individualmente e seqüencialmente. O uso desta técnica traz grandes facilidades, porém, possui um custo inicial alto e requer uma engenharia simultânea, envolvendo *design*, teste e manufatura^[49].

3.4.3 Estratégias de inspeção e teste

Cada uma das técnicas de inspeção e teste apresentadas possui características únicas de custo-benefício. Sendo que nenhuma é 100% perfeita para todas as ocasiões ou para todos os defeitos, é necessário combinar racionalmente várias delas para garantir a qualidade da placa^[49].

A Tabela 1 apresenta uma qualificação das diferentes técnicas de inspeção e teste, baseada na sua capacidade de discernir defeitos. Cabe destacar que a qualificação poderá variar ligeiramente, dependendo das diferentes tecnologias, equipamentos e procedimentos usados.

Tabela 1 - Métodos de inspeção e teste versus cobertura de defeitos ^[56]

	MVI	AOI	AXI	ICT	FPT	FT
Curto	◆	◆	✓	◆	◆	◆
Ausência de solda	✗	◆	✓	◆	◆	◆
Confiabilidade da solda	✗	◆	✓	✗	✗	✗
Componente errado	✗	✓	✗	✓	✓	◆
Componente faltando	◆	✓	✓	✓	✓	◆
Componente danificado	✗	✗	✗	◆	✗	✓
Componente invertido	◆	✓	◆	✓	✓	◆
Confiabilidade funcional	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Legendas						
✗	Baixa ou nenhuma cobertura		MVI – Manual Visual Inspection			
◆	Média cobertura		AOI – Automatic Optical Inspection			
✓	Boa cobertura		AXI – Automatic X-Ray Inspection			
			ICT – In Circuit Test			
			FPT – Flying Prober Test			
			FT – Functional Test			
Suposições						
5000 pontos, 25000 juntas de solda, 80% de acesso aos pontos, 10 componentes BGA's.						

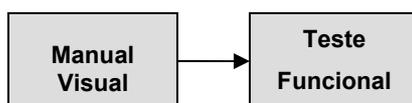
A estratégia de inspeção e teste consiste em definir as técnicas e métodos que serão utilizados para verificar a confiabilidade e funcionalidade do produto eletrônico produzido. Esta deve ser desenvolvida apresentando um balanço correto entre o investimento em melhorar a capacidade do processo de montagem de placas de circuito impresso e o desempenho da inspeção e do teste em identificar os defeitos gerados no projeto e na montagem ^[29].

Os principais fatores que devem ser levados em consideração na escolha de uma técnica de inspeção e teste são ^{[23],[53],[55],[56]}.

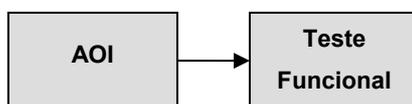
- Espectro de defeitos – a cobertura de defeitos da inspeção e do teste compatível com os principais defeitos que ocorrem na manufatura das placas de circuito impresso.
- Complexidade do produto – inspeções e testes confiáveis para todos os tipos de produtos produzidos pela empresa.
- Volume de produção – rendimento da inspeção e do teste capazes de suprir o volume de produção da linha.
- Custo – custo de aquisição do equipamento, programação e manutenção compatíveis com o retorno do investimento.
- Diversidade das montagens – necessidade de equipamentos flexíveis e simples de serem programados.

Até os anos 90, a melhor estratégia de inspeção e teste consistia em executar uma inspeção visual manual durante a montagem e em seguida, fazer os testes ICT e funcional no produto. Com isto, era possível detectar 100% dos defeitos em quase todas as placas de circuito impresso produzidas. Atualmente, com a complexidade e a miniaturização dos componentes esta estratégia nem sempre é eficaz. Na Figura 26 são mostrados alguns exemplos de estratégias de inspeção e teste na produção de placas de circuito impresso ^[23]:

Placas de baixa complexidade com baixo volume de produção



Volume muito alto de produto com pouco acesso a pontos de teste



Placas muito complexas necessitando a mais alta cobertura de teste

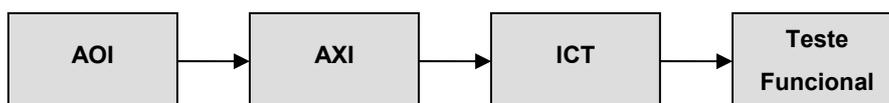


Figura 26 - Exemplos de estratégias de inspeção e teste ^[23]

Estas estratégias podem ser utilizadas como subsídio na geração do plano de controle. No entanto, deve-se lembrar que a validação final da estratégia de inspeção e testes somente é possível quando dados objetivos do comportamento da placa em campo mostrarem que o nível de qualidade e confiabilidade alvejado pelo cliente foi efetivamente alcançado.

3.5 ASPECTOS METROLÓGICOS

Para que o processo seja controlado de forma adequada é necessário ter confiabilidade nos dados medidos. A calibração e o estudo de GR&R dos meios de medição são técnicas fundamentais para garantir que medições produzam resultados confiáveis.

3.5.1 Calibração

Calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões ^[57]. Como resultado da calibração obtêm-se as correções a serem aplicadas nos resultados, bem como a respectiva incerteza de medição associada a esta correção. Os benefícios da calibração são:

- garantia da rastreabilidade das medições;
- confiabilidade nos resultados medidos;
- correção dos resultados;
- seleção adequada do instrumento ou sistema de medição;
- possibilidade de melhoria da qualidade do processo.

Os meios de medição devem ser calibrados periodicamente, em intervalos de tempo definidos pela empresa e em todas as vezes que ocorrer sobrecargas, quedas, mau uso, manutenções, reposição de instrumentos ou desconfiança dos resultados de medição. Uma forma de controlar o intervalo de calibração é através

da verificação. A verificação está associada ao gerenciamento do equipamento de medição, e oferece um meio de se certificar que os desvios entre os valores indicados por um instrumento de medição e os valores conhecidos correspondentes são menores que o limite de erro permissíveis ^[58].

No processo de montagem de placa de circuito impresso os equipamentos de medição são utilizados para monitorar os parâmetros das máquinas e verificar a qualidade dos materiais de entrada. Os principais equipamentos de medição que necessitam de calibração são:

- wave rider – utilizado para medir os parâmetros da máquina de solda por onda (temperatura da solda, temperatura de pré-aquecimento, tempo de contato com a solda);
- oven rider – utilizado para medir o perfil térmico do forno de refusão;
- viscosímetro – utilizado para medir a viscosidade da pasta de solda;
- densímetro – utilizado para medir a densidade do fluxo usado na máquina de solda por onda;
- multímetro – utilizado para medir as características elétricas dos componentes (resistência, capacitância, indutância);
- instrumentos integrados nas máquinas que compõem as linhas SMT e TH, quando eventuais desvios nas leituras dos mesmos afetem de forma significativa a qualidade do produto.

O plano de controle deve fornecer uma boa orientação para identificar quais instrumentos devem ser calibrados, por estarem relacionados com características especiais de produto processo.

3.5.2 Estudos de repetitividade e reprodutibilidade (GR&R)

A repetitividade² e a reprodutibilidade³ de instrumentos estão sendo adotadas por muitas empresas para avaliar padrões ou a capacidade dos sistemas de

² **Repetitividade** – grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição ^[57].

³ **Reprodutibilidade** - grau de concordância entre os resultados da medição de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição ^[57].

medição. O estudo de repetitividade e reprodutibilidade é uma ferramenta estatística que mede a quantidade de variação no sistema de medição resultante do equipamento de medição e o do operador. O estudo pode ser usado como ^[38]:

- um critério para julgar um novo equipamento de medição;
- uma comparação entre os equipamentos de medição;
- um meio para melhorar a performance dos equipamentos de medição;
- uma comparação para avaliar o equipamento antes e depois do reparo;
- um componente necessário para melhorar a estimativa da variação do processo;
- uma medida da necessidade de treinamento dos operadores para utilização dos equipamentos de medição.

Existem diversos padrões para realização de estudos de repetitividade e reprodutibilidade ^{[59],[60],[61]}. O método mais difundido no Brasil é o recomendado para aplicação na indústria automotiva, no escopo do sistema de gestão da qualidade ISO/TS 16949 ^[59]. Nele, a repetitividade e reprodutibilidade são estimadas fazendo com que vários operadores meçam um conjunto de unidades de produto repetidas vezes (tipicamente 10 unidades, três operadores, três repetições). O valor é obtido combinando os desvios padrões estimados de repetitividade e reprodutibilidade, denominado de GRR, este é então multiplicado por seis e dividido pela tolerância, avaliando se o processo de medição é adequado para a tarefa de controle:

- $GRR(\%Tol) \leq 10\% \rightarrow$ o processo de medição é capaz;
- $10\% < GRR(\%Tol) \leq 30\% \rightarrow$ o processo de medição é aceitável com reservas;
- $GRR(\%Tol) > 30\% \rightarrow$ o processo de medição é inaceitável.

O estudo da GR&R deve ser aplicado para todos equipamentos de medição que medem as variáveis usadas para monitorar as características especiais do produto e do processo. As necessidades de realizar esse estudo podem também estar detalhada no plano de controle. É recomendável que os estudos da repetitividade e reprodutibilidade sejam executados antes do instrumento entrar em uso pela primeira vez e/ou quando houver mudança nos funcionários da produção

que usem os instrumentos de medição. Existem empresas que realizam estudos periódicos, mas isso pode acarretar custos desnecessários. É preferível decidir caso a caso, zelando sempre pela confiabilidade das medições.

Como já foi mostrado na seção 2.4 desta dissertação, a maior parte da informação que descreve a qualidade das placas de circuito impresso é baseada em dados tipo atributo, tipicamente contam-se defeitos de distintos tipos. Quando se realiza inspeção visual manual, os operadores podem discrepar com eles mesmos, quando inspecionam repetidamente a mesma placa (sem saber que é a mesma), evidenciando um problema na repetitividade da inspeção. De forma semelhante, um operador pode apresentar uma tendência a declarar mais defeitos do que outro operador, quando os dois analisam o mesmo conjunto de placas, evidenciando um problema na reprodutibilidade da inspeção. Embora estes problemas possam ser minimizados através de treinamentos e da utilização de procedimentos incluindo padrões visuais, eles são usualmente responsáveis por boa parte dos desvios da qualidade. Placas que poderiam ser passadas são retrabalhadas desnecessariamente, e placas que deveriam ser retrabalhadas são passadas ao cliente, resultando em falhas em campo.

Nesse caso, recomenda-se a realização de estudos de repetitividade e reprodutibilidade para dados tipo atributo. Estes estudos devem ser conduzidos para cada um dos tipos de defeito mais incidentes separadamente, pois é impossível considerar que o comportamento dos operadores é consistente, quando avaliam os diferentes tipos de defeitos. Recomendações para a realização destes estudos podem ser encontradas no manual de Análise de Sistemas de Medição ^[59]. Infelizmente, devido o escasso conteúdo de informação dos dados tipo atributo, precisa-se de amostras de produto relativamente grandes (50 placas). Recomenda-se envolver dois ou três operadores, realizando um mínimo de duas repetições por operador. É importante, ainda, estabelecer a qualificação de referência de cada amostra, usando um método de avaliação independente. Tudo isso resulta em estudos longos e conseqüentemente caros. Apesar disso, casos de sucesso em áreas afins permitem afirmar que são os estudos de repetitividade e reprodutibilidade para dados de atributos não somente são imprescindíveis para garantir a qualidade das placas, mas também podem vir a reduzir os custos totais de produção ^[62].

3.6 INDICADORES DE DESEMPENHO

A medição de desempenho de uma empresa é fundamental para a gestão da qualidade, constituindo um sistema de apoio para o planejamento, solução de problemas, tomada de decisões, melhoria, controle e motivação.

Uma das vantagens de se possuir indicadores é que eles auxiliam a empresa na busca pelo aumento de qualidade e produtividade. Ao informar em que patamar uma empresa se situa, ela pode estabelecer metas e planos de melhoria para obter níveis desejados de desempenho.

Uns dos principais tipos de indicadores de desempenho estão relacionados à qualidade e à produtividade. Os indicadores de produtividade expressam a preocupação da empresa com a eficiência, ou seja, a busca da racionalização no uso dos recursos disponíveis, enquanto que os indicadores da qualidade refletem a posição da empresa na busca da eficácia, ou seja, na geração do produto ou serviço de qualidade, para atender às necessidades do cliente ^[63].

Os indicadores a serem adotados dependem do que se quer medir: processo, produto, sistema da qualidade, fornecedor. Alguns exemplos de indicadores de qualidade e produtividade usados na indústria de montagem de placas de circuito impresso são listados nas seções a seguir ^[64].

3.6.1 Indicadores de qualidade

1. Rendimento da montagem (FPY) – revela a porcentagem de placas montadas sem defeitos. O FPY é o número de placas aceitas dividido pelo número de placas inspecionadas.
2. Defeitos por Milhão de Oportunidades (DPMO) – está se tornando um índice padrão para medir e comparar a qualidade. O DPMO é o número de defeitos por unidade (placa) dividido pelo número de oportunidades de defeitos (número de juntas ou número de componentes), multiplicado por um milhão.
3. Defeitos por Unidade (DPU) – é o número de defeitos num lote dividido pelo número de unidades (placas), multiplicado por um milhão.

4. Capacidade – revela a capacidade que o processo tem de produzir produtos de acordo com as especificações dos clientes. Uma maneira de expressar a capacidade dos processos é através de índices capacidade. Para calcular os índices de capacidade exige-se que o processo seja estável e possua distribuição similar à distribuição normal. Os índices de capacidades mais utilizados são o C_p e C_{pk} . Utiliza-se C_p quando é possível assumir que o processo está centrado no valor médio, uma vez que o cálculo do C_p leva em conta apenas as especificações do processo e sua variabilidade. Assim conclui-se que o C_p mede a capacidade potencial do processo. Por sua vez, o cálculo do C_{pk} leva em consideração o valor da média do processo. Logo, o C_{pk} pode ser interpretado como uma medida da capacidade real do processo. Quando um processo estiver centrado na média, os valores de C_p e C_{pk} serão iguais. No processo de montagem de placas de circuito impresso, estes índices são usados principalmente para medir a capacidade das máquinas.

3.6.2 Indicadores de produtividade

1. Utilização da máquina – mostra a porcentagem de tempo que o equipamento de montagem está efetivamente sendo usado na montagem de placas. O valor é obtido dividindo o número de horas utilizadas pelo número de horas disponíveis.
2. Eficiência de montagem – mostra (em porcentagem) a relação entre o tempo padrão da montagem e o tempo real de montagem requerido para completar uma placa.
3. Produtividade – este indicador mostra (em porcentagem) o produto entre a utilização da máquina e a eficiência de montagem.

3.7 NORMAS E RECOMENDAÇÕES

Existem vários documentos que são úteis para entendimento e implantação da garantia da qualidade em produção de placas de circuito impresso. Alguns possuem informações sobre materiais, projeto e fabricação das placas, enquanto outros dão detalhes operacionais de processos e inspeções.

O IPC (Association Connecting Electronics Industries) é a maior organização que desenvolve recomendações e diretrizes para placas de circuito impresso e substratos para montagem de componentes.

A seguir serão citadas importantes normas e recomendações classificadas segundo seu âmbito de aplicação.

3.7.1 Desenvolvimento do produto

- SMC-WP-004 ^[65] – metodologia do DFX;
- IPC-D-279 ^[66] – conceitos de design, guias e procedimentos para confiabilidade de montagem das placas;
- IPC-SM-782A ^[67] – padrões de ilhas de todos os componentes passivos e ativos;
- IPC-7095 ^[68] – informações práticas sobre BGA's;
- J-STD-013 ^[69] – requisitos e interações necessárias para o processo de montagem para interconexões de alta performance e pacotes de componentes com alta quantidade de terminações.

3.7.2 Desenvolvimento do processo e produção

- IPC-7530 ^[70] – guia para a construção de um perfil de temperatura apropriado;
- IPC-TR-460A ^[71] – checklist das causas e ações de correções para máquina de solda por onda;
- IPC-S-816 ^[72] – guia dos tipos de problemas e soluções para montagem SMT;
- IPC-DRM-53 ^[73] – descrição do processo de montagem de placas de circuito impresso;
- IPC-DRM-18F ^[6] – guia para identificação de componentes;
- IPC-PD-335 ^[74] – descrição dos pacotes de componentes eletrônicos;
- IPC-CM-770D ^[75] – guia de preparação dos componentes para montagem de placas de circuito impresso;

- J-STD-033A ^[76] – métodos para manusear, empacotar, transportar e usar componentes SMT sensíveis;
- IPC-7711 ^[77] – procedimentos de retrabalho para montagem de placas;
- IPC-7525 ^[78] – guia para especificação de estêncil para aplicação de pasta de solda;
- IPC 9850 ^[79] – estabelece os procedimentos para caracterizar e documentar a capacidade das máquinas de inserção de componentes SMT.

3.7.3 Inspeção e teste

- J-STD-001C ^[80] – materiais, métodos e critérios de verificação para interconexões de soldas e montagem;
- IPC-A-610C ^[81] - critérios para montagem eletrônica (requisitos de orientação dos componentes, soldagem, etc);
- IPC-MI-660 ^[82] – informações, especificações e métodos de testes para inspeção e avaliação dos materiais de entrada;
- IPC-A-600F ^[83] – informações das condições aceitáveis e não aceitáveis para uma placa de circuito impresso nua;
- J-STD-004 ^[84] – requisitos para classificação e qualificação dos fluxos;
- J-STD-005 ^[85] – requisitos para caracterização e qualificação da pasta de solda;
- IPC-9701 ^[86] – avaliação de performance e confiabilidade da soldagem dos componentes SMT.

3.7.4 Cálculo de indicadores

- IPC-7912 ^[87] – cálculo do DPMO para o processo de montagem de placas;
- IPC-9261 ^[88] - cálculo do DPMO para o processo de montagem de placas.

3.7.5 Gestão da qualidade

- NBR ISO 9000 ^[45] – Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e Vocabulário;
- NBR ISO 9001^[89] – Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos;
- NBR ISO 9004 ^[43] – Sistemas de gestão da qualidade – Diretrizes para melhorias de desempenho;
- ISO/TS 16949 ^[44] – Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevance service part organizations.

3.8 SÍNTESE

O capítulo apresentou os métodos de garantia da qualidade e as principais técnicas de inspeção e teste utilizados no processo de montagem das placas.

A Figura 27 mostra de forma generalizada a estruturação dos métodos de garantia da qualidade apresentados.

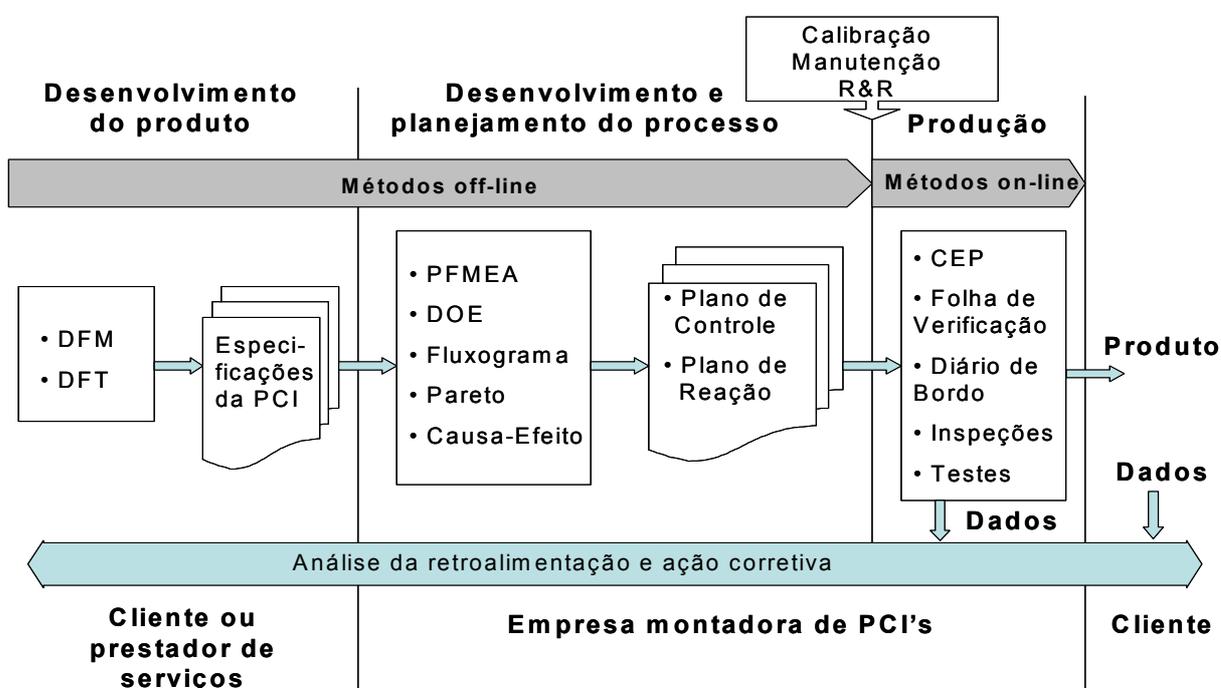


Figura 27 - Estruturação dos métodos de garantia da qualidade para montagem de placas de circuito impresso

Foi destacado que para conseguir a qualidade no processo de montagem é necessário iniciar pelo desenvolvimento do produto, para que o projeto possa garantir que a placa de circuito impresso seja fabricada, montada, testada e reparada de forma eficiente e com qualidade. No desenvolvimento e planejamento do processo são aplicados métodos que visam o ajuste e a melhoria do processo, a prevenção de falhas e a sistematização das operações. Finalmente, na produção os métodos são aplicados para manter o processo com a mínima variação possível, sendo que, os dados gerados durante o processo produtivo devem criar um ciclo de melhoria contínua para todas as etapas. Esse mesmo destino deve-se dar à informação sobre o funcionamento da placa em campo e a eventuais reclamações do cliente (direto e final).

Entretanto, deve-se observar que a diversidade e complexidade das ações a serem realizadas, a falta de uma cultura da qualidade, o enxuto das equipes de trabalho e a baixa capacidade de investimento atentam contra a implantação de modelos complexos de garantia da qualidade nas empresas montadoras de placas de circuito impresso. No próximo capítulo está apresentada uma proposta para superar estes problemas.

4 SISTEMÁTICA DE IMPLANTAÇÃO DA GARANTIA DA QUALIDADE

Um sistema de qualidade pode ser definido como um sistema para dirigir e controlar uma organização, no que diz respeito à qualidade ^[45]. Este capítulo apresenta uma sistemática de implantação de um sistema de garantia da qualidade capaz de melhorar progressivamente a qualidade e a eficiência das empresas montadoras de placas de circuito impresso e com isto aumentar sua competitividade no mercado nacional e internacional.

Estruturalmente a sistemática proposta nesta dissertação está dividida em três fases de implantação, definidas a partir de quatro estágios, como ilustrado na Figura 28. As fases contêm as atividades necessárias para alcançar os objetivos, enquanto que os estágios indicam o nível de qualidade esperado da empresa antes e depois da implantação de uma determinada fase. Desta forma, a implantação das três fases desta sistemática permitirá levar a empresa desde um estágio caracterizado pela gestão empírica, resultando em alta ineficiência e baixa qualidade, até outro estágio, onde a empresa seja capaz de montar placas de alta complexidade com qualidade comprovada.

Propôs-se uma divisão em fases de implantação por ser tecnicamente e economicamente mais viável. Algumas justificativas para a divisão em fases são:

1. A cultura da qualidade numa empresa não se desenvolve de forma imediata, ou seja, é necessário vencer barreiras técnicas e humanas, portanto, é aconselhável dividir os objetivos por grau de dificuldade.
2. O conhecimento do produto e do processo acumula-se de forma gradativa, assim sendo, não é possível atuar imediatamente sobre todos os fatores que geram problemas de qualidade.

3. O investimento financeiro irá aumentar gradativamente conforme a empresa avance de estágio, permitindo uma melhor administração dos custos.
4. A utilização de alguns dos métodos da garantia da qualidade, introduzidos no Capítulo 3, necessitam de informações disponíveis ou objetivos já atingidos.
5. A sistemática pode ser aplicada em empresas que possuem diferentes níveis de qualidade, implantando a fase adequada para cada empresa.

	FASE 1	FASE 2	FASE 3
DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	DFM		DFT
DESENVOLVIMENTO E PLANEJAMENTO DO PROCESSO	Fluxograma		
	Procedimentos		
	Diagrama Pareto		
	Diagrama causa-efeito		
	Treinamentos		
	Plano de controle		
	Plano de reação		
		PFMEA	DOE
PRODUÇÃO	Diário de bordo		
	Folha de verificação		
	Rastreabilidade		
	Manutenção		
		CEP	Aquisição automática dos dados de produção
INSPEÇÃO E TESTE	Manual Visual		
		AOI	
	Funcional		AXI
			ICT
			Aquisição automática dos dados de inspeção
ASPECTOS METROLÓGICOS	Calibração		
		R&R	
INDICADORES	DPMO (IPC-7912)		
		DPMO (IPC-9261)	
	Índice Complexidade		
			Cp e Cpk Índice Produtividade
	ESTÁGIO 1	ESTÁGIO 2	ESTÁGIO 3
			ESTÁGIO 4

Figura 28 - Sistemática de implantação da garantia da qualidade para o processo de montagem de placas de circuito impresso

Vale ressaltar que o processo de implantação deve ser acumulativo, ou seja, todos os métodos e ferramentas da qualidade utilizados numa determinada fase,

devem ser mantidos e aprimorados na fase seguinte. Além disso, é esperado que para todas as atividades propostas pela sistemática exista a busca da melhoria contínua, usando o ciclo PDCA⁴. A Figura 29 ilustra a metodologia do ciclo do PDCA aplicado para o processo de montagem de placas circuito impresso.

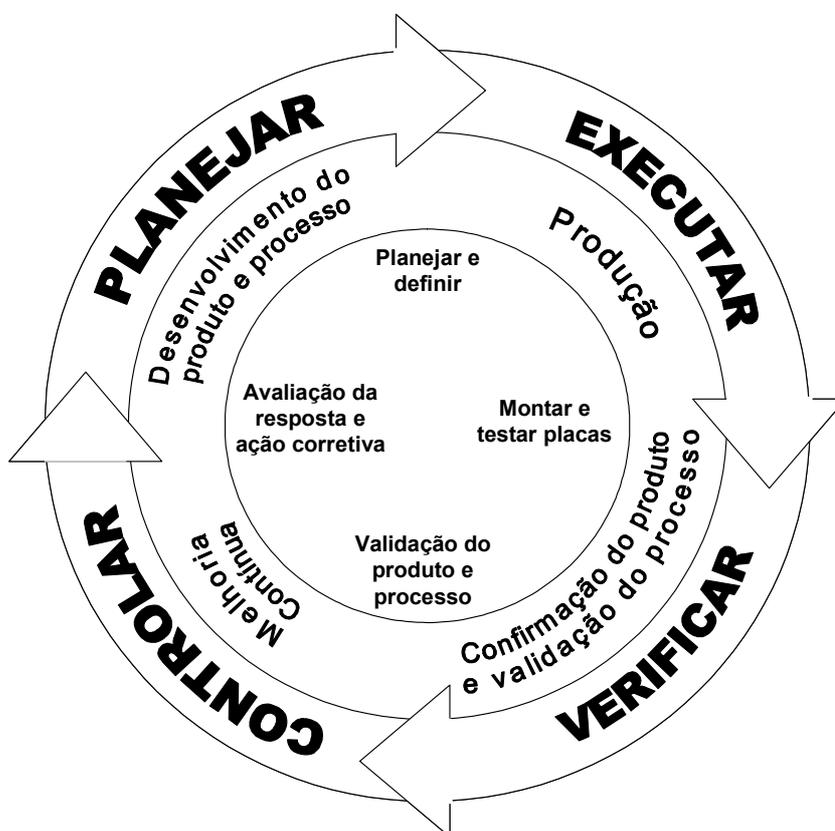


Figura 29 - Ciclo do PDCA aplicado ao processo de montagem de placas de circuito impresso (adaptado de ^[41])

Para que a sistemática possa ser implantada é exigida uma estrutura organizacional mínima composta de três funções principais: desenvolvimento do processo, gerenciamento do processo e análise da qualidade. Dependendo do tamanho da empresa, estas funções poderão ser executadas por um ou mais indivíduos, embora o ideal seja contar com perfis diferenciados para cada função.

Cada componente da estrutura terá responsabilidades e funções específicas, conforme ilustrado na Figura 30.

⁴ **CICLO PDCA** - Metodologia para planejamento de ações utilizadas para manter ou melhorar processos, composto de quatro fases básicas: P (Plan) Planejamento, D (Do) Execução, C (Check) Verificação e A (Act) Ação Corretiva.

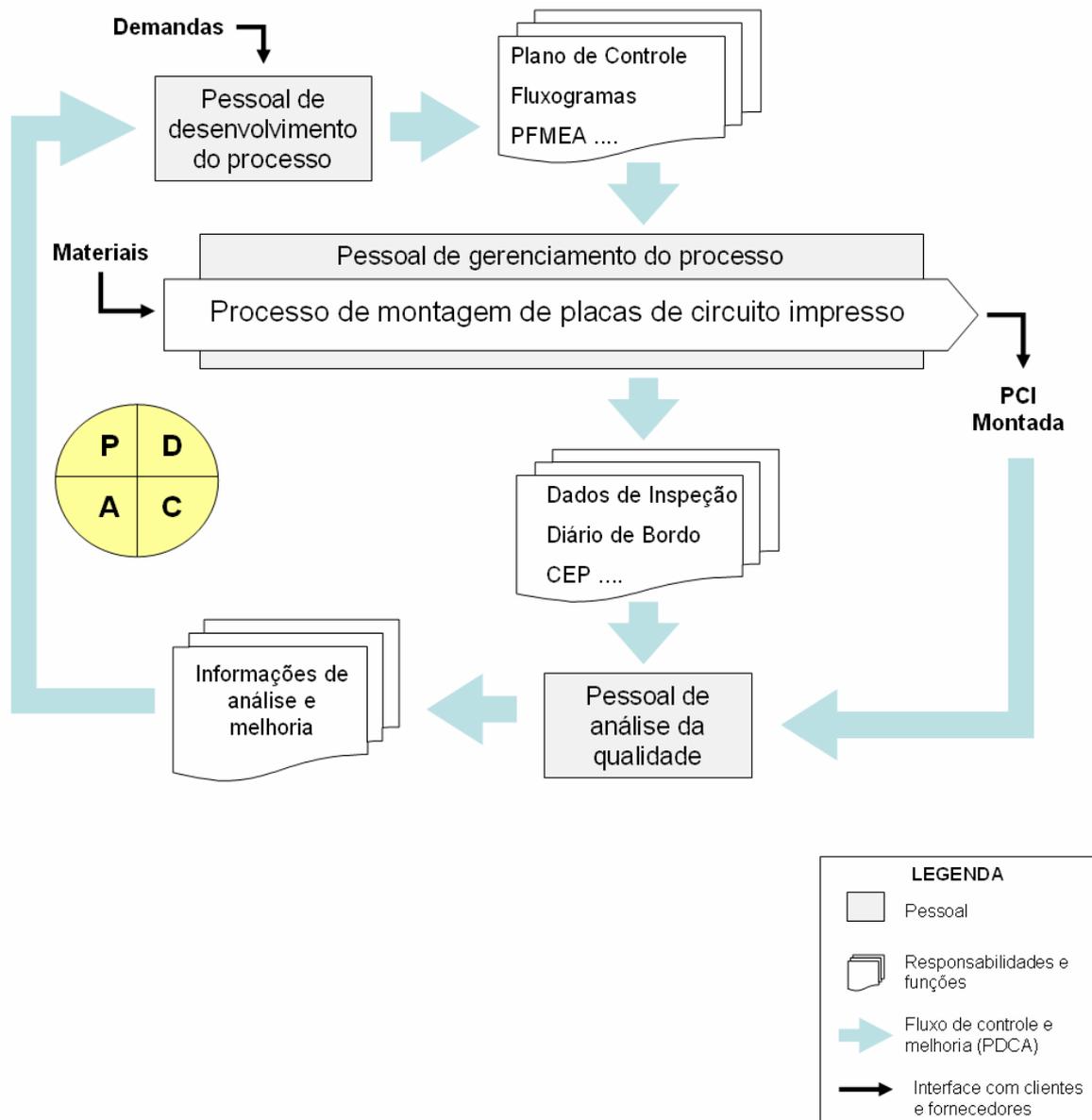


Figura 30 - Estrutura organizacional mínima para implantação da sistemática

Caso a empresa não possua mão-de-obra capacitada para executar as atividades propostas para as três funções, será necessária a contratação de novos funcionários ou procurar meios alternativos, como: terceirização dos serviços, especialização dos funcionários, convênios com universidades e centros de tecnologias, intercâmbios de funcionários com outras empresas.

4.1 FASE 1 OU FASE DE ANÁLISE E SISTEMATIZAÇÃO DOS PROCESSOS

A Fase 1 é onde se inicia a cultura da qualidade dentro da empresa (Figura 31). Esta é caracterizada pela análise e sistematização dos processos. O entendimento do produto e do processo e a estruturação das atividades realizadas durante o processo produtivo são os objetivos gerais desta fase.

	FASE 1	FASE 2	FASE 3
DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	DFM		DFT
DESENVOLVIMENTO E PLANEJAMENTO DO PROCESSO	Fluxograma		
	Procedimentos		
	Diagrama Pareto		
	Diagrama causa-efeito		
	Treinamentos		
	Plano de controle		
	Plano de reação		
		PFMEA	DOE
PRODUÇÃO	Diário de bordo		
	Folha de verificação		
	Rastreabilidade		
	Manutenção		
		CEP	Aquisição automática dos dados de produção
INSPEÇÃO E TESTE	Manual Visual		
		AOI	AXI
	Funcional		ICT
			Aquisição automática dos dados de inspeção
ASPECTOS METROLÓGICOS	Calibração		
		GR&R	
INDICADORES	DPMO (IPC-7912)		
		DPMO (IPC-9261)	
	Índice Complexidade		
			Cp e Cpk
			Índice Produtividade
	ESTÁGIO 1	ESTÁGIO 2	ESTÁGIO 3
			ESTÁGIO 4

Figura 31 – Conjunto de métodos e ferramentas da qualidade utilizados na Fase 1

Sua implantação está voltada para empresas que se encontram no “Estágio 1” da qualidade (Tabela 2), caracterizada pela gestão empírica dos processos produtivos e pela inexistência de um sistema de gestão da qualidade. Com ligeiras variações, este é o estado típico de muitas pequenas e microempresas montadoras de placas de circuito impresso operando no Brasil.

Tabela 2 - Características da empresa situada no “Estágio 1” da qualidade

Qualidade	Política da qualidade	Não definida ou não implementada
	Manual da Qualidade	Não existe
	ISO 9000	Não implantada
	Indicadores	Não utiliza
Funcionários	Treinamento	Básico para operação do processo
Processo	Procedimentos de trabalhos	Embrionários / parciais
	Gestão de processos	Empírica
	Retrabalhos	Massivos
	Fração não conforme	Desconhecida e não previsível
	Inspeção	Visual no produto
	Metrologia	Não praticada
Produto	Projeto	Definido pelo cliente e aceito pela montadora sem questionamentos
	Materiais	Fornecidos pelo cliente, aceitos pela montadora sem restrições
	Complexidade	Competência para montagem de placas de baixa complexidade (até 5000 pontos; menos componentes BGA's)

Os objetivos específicos desta fase são:

- melhoria do conhecimento sobre o produto e o processo;
- sistematização dos processos;
- preparação da empresa para certificação ISO 9000;
- envolvimento dos clientes, funcionários e fornecedores no ciclo da qualidade;
- estruturação do sistema de informação sobre a qualidade;
- eliminação dos problemas evidentes e redução de retrabalhos e refugos;

- redução da taxa de defeitos para abaixo de 2700 ppm (placas com defeito no cliente).

Por ainda não possuir um efetivo controle do processo, será necessário nesta fase dispensar um tempo considerável em retrabalhos, inspeções e testes. A grande vantagem da Fase 1 é a possibilidade de ser realizada com pouco aporte financeiro e ainda estrutura a empresa para a certificação ISO 9000 ^[43], que é fundamental para uma empresa sobreviver no mercado.

4.1.1 Metodologia de implantação da Fase 1

A seguir será detalhada a metodologia de implantação das atividades propostas pela Fase 1 da sistemática, apresentadas na ordem em que aparecem nos ciclos da Figura 29 e Figura 30.

4.1.1.1 Planejamento e definição do processo

Nesta fase, o planejamento do processo foca principalmente na organização e sistematização, buscando eliminar situações que gerem problemas de qualidade. As atividades que estão sob responsabilidade do pessoal de desenvolvimento do processo são:

- implantar o uso de técnicas de DFM;
- elaborar fluxograma do processo;
- elaborar procedimentos e instruções de trabalho;
- elaborar plano de controle e plano de reação;
- elaborar instruções de inspeção;
- auxiliar o pessoal de produção na implementação do sistema de garantia da qualidade;
- sistematizar as melhorias sugeridas pelo pessoal da produção e análise da qualidade.

O projeto da placa de circuito impresso está intensamente ligado com o rendimento e com a qualidade na montagem, sendo o projeto para

manufaturabilidade (DFM) a principal metodologia utilizada para conseguir eficácia na montagem do produto. Entretanto, uma empresa montadora de placas de circuito impresso nem sempre é a responsável pelo projeto da placa, acontecendo freqüentemente do projeto da placa ser incompatível com o processo de montagem. Para evitar essa situação é necessário que a empresa desenvolva conhecimentos de DFM para:

- repassá-los aos clientes, de forma que estes melhorem o projeto das placas e permitam atingir patamares mais elevados de qualidade na montagem;
- os desvios com referência ao projeto ótimo ser considerados na hora de receber uma ordem de compras, para alertar ao cliente sobre os problemas que podem ocorrer e ajustar o orçamento considerando os retrabalhos decorrentes.

Um meio para empresa alcançar esses objetivos é através da elaboração de um manual de DFM contendo todos os requisitos necessários para a placa de circuito impresso ser montada eficientemente. Para auxiliar a elaboração do documento de DFM existem as normas SMC-WP-004 ^[65], IPC-D-279 ^[66] e IPC-SM-782 ^[67], além de referências similares encontradas em livros e artigos na Internet. Os funcionários que estão ligados ao processo e ao produto devem ser treinados e envolvidos com a utilização desse documento.

Devem ser criados fluxogramas dos processos de montagem de todos os tipos de placas produzidos comumente pela empresa. O fluxograma serve para visualizar o processo de montagem como um todo, evitando que etapas sejam desconsideradas ou esquecidas, além de facilitar a geração e uso do plano de controle. É importante que esta instância seja aproveitada para refletir sobre os processos, evitando padronizar atividades desnecessárias e ineficazes. Os processos sistematizados devem ser uma versão melhorada dos operados pela empresa no estágio inicial da Fase 1.

Também é necessária a criação de procedimentos e instruções para todas as atividades que influenciam na qualidade da placa de circuito impresso. Entre essas, podemos destacar: operação de máquinas e equipamentos, inspeção, testes, manutenção, embalagem, armazenamento e transporte.

Outras “ferramentas-chave” desta fase são o plano de controle e seu associado, o plano de reação. Um plano de controle deve ser elaborado toda vez que uma nova placa entrar em produção, indicando onde, como e quando devem ser executados os controles. Já o plano de reação deve conter os procedimentos a serem realizados quando não-conformidades forem encontradas. Estes documentos devem ser elaborados de forma enxuta servindo apenas de um guia para as instruções detalhadas ao operador. Inicialmente algumas das informações contidas no plano de controle e no plano de reação poderão ser determinadas de forma empírica, de acordo com a experiência da equipe, por recomendações de terceiros ou exigências do cliente. Porém, o plano de controle e o plano de reação, assim como os demais documentos, devem ser atualizados e aprimorados continuamente na medida que se acumule conhecimento dos processos e melhoria da qualidade.

Ainda relacionado com a sistematização dos processos, devem ser criados registros contendo os parâmetros de processo usados para a montagem de cada modelo de placa.

Para a elaboração de todos esses documentos é recomendada a utilização de normas (ex: IPC-DRM-53 ^[73], IPC-CM-770D ^[75], J-STD-033A ^[76] e IPC-7711 ^[77]), manuais dos fabricantes das máquinas e equipamentos, informações dos fornecedores de materiais e clientes da montadora, livros e artigos especializados (ex: ^[8], ^[49] e ^[90]).

4.1.1.2 Produção

Na Fase 1, o pessoal de gerenciamento dos processos deverá realizar as atividades a seguir:

- revisar e monitorar o estado das máquinas e equipamentos de produção;
- providenciar a calibração dos instrumentos de medição e verificá-los periodicamente;
- promover e monitorar a utilização dos documentos do sistema de garantia da qualidade (diário de bordo, folha de verificação, instruções de trabalho e de inspeção);

- promover o treinamento dos operadores em aspectos relevantes dos processos de montagem, inspeção e testes;
- definir e registrar os valores ideais dos parâmetros de processo;
- providenciar a identificação de todas as placas produzidas, visando á obtenção de rastreabilidade interna e externa;
- garantir o preenchimento das folhas de verificação e diários de bordo;
- auxiliar o pessoal de desenvolvimento do processo na elaboração e atualização dos documentos (plano de controle, plano de reação, fluxogramas);
- auxiliar o pessoal de análise da qualidade, fornecendo dados e informações confiáveis nos quais possa se basear o esforço de melhoria.

A produção confiável somente poderá ser alcançada se os equipamentos de produção estiverem em boas condições de operação. Para isto, deve ocorrer uma revisão em todas as máquinas e equipamentos de processo e a calibração dos meios de medição dedicados ao controle dos parâmetros de fabricação. Além disso, deve-se iniciar um plano de manutenção preventiva dos equipamentos de produção e um plano de verificação periódica dos meios de medição, sendo que os detalhes e os procedimentos para executarem estas atividades devem ser definidos na etapa de desenvolvimento e planejamento do processo.

Durante a produção é quando ocorre a coleta de informações para a análise do processo, usando diários de bordo e folhas de verificação. Porém, antes de iniciar a operação de coleta de informações é necessário que exista rastreabilidade de produto. Portanto, todas as placas devem ser identificadas com um número serial antes de entrarem no processo de montagem, a fim de que se possa determinar o momento exato da montagem. Nesta instância o pessoal da produção pode se deparar com placas nas quais o projetista não deixou espaço para identificação, impossibilitando a rastreabilidade. Essa situação deve ser superada necessariamente, já que sem rastreabilidade não existe análise de processos nem melhoria contínua. Eventualmente, pode-se aderir à placa uma etiqueta auto-adesiva que, embora retirada depois pelo cliente, possibilite uma identificação durante o processo de montagem.

Para registro das informações de produção serão introduzidos nesta fase os formulários de diário de bordo e folha de verificação. O diário de bordo pode ser implantado por máquina, etapa do processo ou linha de montagem. No diário de bordo devem estar descritas todas as modificações, situações especiais e observações que ocorrem durante o processo de montagem, indicando a data e a hora da ocorrência, o nome do operador que anotou a informação e o número da placa que estava sendo montada no momento. A folha de verificação é um formulário que deve ser preenchido todas as vezes que ocorrer inspeção na placa de circuito impresso ou monitoramento dos parâmetros de processo, indicando os defeitos encontrados e o registro do estado do processo. A utilização da folha de verificação deve estar referenciada ao plano de controle, indicando os dados que devem ser coletados. Este formulário é usado posteriormente para calcular os indicadores da qualidade e para estudar o comportamento do processo.

A técnica de inspeção mínima exigida na Fase 1 é a visual manual. Esta poderá ser 100% ou amostral, dependendo do desempenho da montagem. A inspeção deve acontecer no recebimento dos materiais (eliminação dos defeitos aparentes) e durante a montagem da placa. Para auxiliar e padronizar os tipos de defeitos encontrados durante a inspeção da placa de circuito impresso é recomendada a utilização das normas J-STD-001C ^[80] e IPC-A-610C ^[81].

No entanto, a técnica de inspeção visual manual é bastante limitada e seu uso é aceitável somente para placas de baixa complexidade com baixo volume de produção. Portanto, é de se esperar que a inspeção não detecte a totalidade dos defeitos produzidos pelo processo. Assim, a estatística dos defeitos identificados pela inspeção fornecerá uma idéia otimista da qualidade produzida.

A última etapa do processo de montagem são os testes. Durante todas as fases exige-se que as placas passem por testes funcionais antes de ser entregue ao cliente. Entretanto, para as empresas montadoras que não desenvolvem o projeto da placa nem sempre é possível que o teste funcional ocorra dentro da empresa. Neste caso, é sugerido que exista uma relação direta e aberta entre a montadora e o cliente que executou os testes, para que informações importantes sobre o desempenho da montagem não sejam perdidas.

Cabe ressaltar que todas atividades descritas acima devem ser acompanhadas de treinamentos. O treinamento é fundamental para capacitar os funcionários a operarem o sistema de qualidade proposto e, mais do que isso, conscientizá-los que eles são partes integrantes de um sistema da qualidade. Os treinamentos para esta fase devem ser voltados para a operação do processo e para a interpretação e uso de procedimentos e instruções de trabalho.

4.1.1.3 Análise da qualidade

O pessoal que realiza a análise da qualidade é responsável pela melhoria contínua do sistema de garantia da qualidade. Para poder executar suas tarefas em forma idônea, deverá estar treinado no uso das ferramentas da qualidade, tais como: diagrama de Pareto, diagrama de causa-efeito e gráfico de correlação. Usando as mesmas, deverá:

- processar as informações coletadas na produção (diário de bordo, folha de verificação);
- processar as informações sobre falhas de placas em testes realizados pelo cliente ou em campo;
- identificar os pontos críticos do processo e os principais tipos de defeitos;
- propor melhorias no processo, nos procedimentos e instruções de trabalho e nas ferramentas de coleta de informação;
- calcular os indicadores da qualidade.

Deverá, também:

- auxiliar o pessoal de desenvolvimento do processo na elaboração e atualização dos documentos (plano de controle, plano de reação, fluxogramas);
- apoiar o pessoal da produção na melhoria dos processos e do sistema de garantia da qualidade *on-line*.

A análise da qualidade deve ser feita através dos dados, registros e observações coletados durante o processo produtivo. Essas informações estão

contidas nas folhas de verificação, diário de bordo, lista de componentes, parâmetros do processo, materiais utilizados e outros.

À medida que os dados vão sendo coletados na produção é recomendada a utilização das seguintes ferramentas:

- diagrama de Pareto – deve ser utilizado para analisar a incidência dos defeitos, este pode ser construído por tipos de defeitos, por pacotes de componentes, por etapas do processo;
- diagrama de causa-efeito – deve ser capaz de indicar as causas que geram os principais defeitos na placas, sua construção pode ser por tipo de defeito (curto, ausência de solda) ou por etapa do processo (máquina de solda por onda, aplicação de pasta de solda);
- gráfico de correlação – pode ser usado para pôr em evidência a relação entre a ocorrência de um tipo de defeito e o estado dos parâmetros do processo.

Sugere-se que os gráficos sejam impressos e colocados em locais estratégicos da empresa, onde todos possam visualizar os resultados.

Na sistemática proposta, o pessoal de análise da qualidade é responsável pela recuperação das informações sobre as falhas acontecidas durante os testes realizados pelo cliente e as falhas de campo. Sem esta informação é praticamente impossível conhecer qual é o verdadeiro nível de qualidade da empresa montadora, dado a baixa capacidade de detecção da inspeção implementada.

Para analisar o desempenho do processo de montagem das placas está sendo proposto o uso de indicadores de qualidade, em particular o DPMO. De forma genérica, o DPMO é simplesmente o número de defeitos encontrados numa amostra dividido pelo número de oportunidades de defeitos, multiplicados por um milhão (Equação 1).

$$DPMO = \frac{n^{\circ} \text{Defeitos}}{n^{\circ} \text{OportunidadesDefeitos}} \times 10^6 \quad (1)$$

A grande vantagem do uso do DPMO sobre os demais indicadores é a normalização da complexidade da placa de circuito impresso. O DPMO utiliza o fator de normalização “oportunidades de defeitos” que permite a comparação entre

produtos de complexidade variada. Por exemplo, um DPMO de 500 ppm não faz distinção entre uma placa contendo 100 componentes de outra que contém 500 componentes ^[91].

O cálculo do DPMO nesta fase está baseado na norma IPC-7912 ^[19], na qual o índice DPMO é dividido em três categorias: componentes, inserções e terminações.

Os tipos de defeitos que devem ser contabilizados a cada categoria são os descritos na seção 2.4. As oportunidades de defeitos são as seguintes:

- Componentes: número de componentes mais um (placa de circuito impresso);
- Inserções: número de componentes;
- Terminações: número de pontos de solda.

Desta forma, através da Equação 1, calcula-se o índice DPMO para cada categoria. A norma também fornece um método para calcular o índice DPMO total da montagem, como mostrado na Equação 2.

$$DPMO = \frac{n^{\circ} Defeitos_{comp.} + n^{\circ} Defeitos_{inser.} + n^{\circ} Defeitos_{term}}{n^{\circ} Op. Defeitos_{comp.} + n^{\circ} Op. Defeitos_{inser.} + n^{\circ} Op. Defeitos_{term.}} \times 10^6 \quad (2)$$

Porém, deve-se lembrar que a exatidão do cálculo do DPMO depende do poder de detecção dos meios de inspeção e teste. Quando nem todos os defeitos contidos na placa forem detectados, o índice DPMO calculado não será realmente o produzido pelo processo ^[92].

Um outro indicador que será usado a partir da Fase 1 é o índice de complexidade. O índice de complexidade é um indicador criado pela Agilent ^{[93].[94]}, que determina de forma objetiva o nível de complexidade da placa para a montagem. As variáveis usadas para definir a complexidade da placa são: número de juntas, número de componentes, número de faces ativas da placa, tamanho do lote e densidade das juntas. O cálculo do índice de complexidade é indicado na Equação 3.

$$\text{ÍndiceComplexidade} = \frac{(C + J)}{100} \times D \times L \times F \quad (3)$$

Onde: C → número de componentes

J → número de juntas

D → densidade das juntas (juntas por $\text{cm}^2/15,5$)

L → Tamanho do lote (lote pequeno = 1; lote grande = $\frac{1}{2}$)

F → Face da placa (face simples = $\frac{1}{2}$; face dupla = 1)

Sendo: ÍndiceComplexidade < 50 → baixa complexidade

ÍndiceComplexidade \geq 50 e < 125 → média complexidade

ÍndiceComplexidade \geq 125 → alta complexidade

A função do índice de complexidade é criar um padrão de comparação entre as diversas placas que são montadas pela empresa. Além disso, pode ser usado como um parâmetro para prever as dificuldades da montagem da placa, orientando em ocasiões como: cálculo do preço de montagem, identificação das técnicas de inspeção e teste necessárias, definição da frequência de inspeção utilizada, pontos de controle no processo.

4.1.1.4 Normas e recomendações

As principais normas e recomendações que auxiliam na implantação da Fase 1 são:

- Desenvolvimento do produto

SMC-WP-004 ^[65], IPC-D-279 ^[66], IPC-SM-782A ^[67].

- Desenvolvimento do processo e produção

IPC-DRM-53 ^[73], IPC-DRM-18F ^[6], IPC-PD-335 ^[74], IPC-CM-770D ^[75], J-STD-033A ^[76], IPC-771 ^[77], IPC-7525 ^[78], J-STD-001C ^[80], IPC-A-610C ^[81].

- Gestão da qualidade

IPC-7912 ^[87], NBR ISO 9001 ^[89], NBR ISO 9004 ^[43].

4.1.2 Considerações finais sobre a Fase 1

Os resultados esperados no final desta fase são:

- nível de qualidade da empresa conhecido;

- defeitos mais incidentes identificados;
- máquinas e equipamentos de produção revisados;
- meios de medição calibrados;
- pontos críticos do processo identificados;
- operações de montagem e inspeção definidas e documentadas;
- estrutura organizacional capaz de analisar e atuar sobre os problemas do produto e processo;
- cliente envolvido com a qualidade da empresa (desenvolvimento do produto e retorno das informações de defeitos);
- problemas mais evidentes eliminados;
- placas e informações sobre qualidade rastreáveis;
- histórico da qualidade implantado.

O tempo previsto para a implantação da Fase 1 é de seis meses a um ano, sendo que as maiores dificuldades para esta fase estão relacionadas ao fator humano. Criar a cultura da qualidade dentro de uma empresa requer o envolvimento, dedicação e persistência de todos os funcionários, o que nem sempre acontece na prática. Para que o programa não fracasse, é necessário que a gerência da empresa exerça a liderança na busca permanente da qualidade.

Embora a Fase 1 está prevista ser realizada com pouco aporte financeiro, dependendo de fatores como: número de funcionários, nível de conhecimento dos funcionários, estado operacional das máquinas e equipamentos, a empresa poderá ter um custo de implantação relevante. No entanto, espera-se que este custo seja compensado pela redução dos custos de retrabalho e refugo, decorrente da sistematização do processo e eliminação de erros grosseiros.

4.2 FASE 2 OU FASE DE CONTROLE E MELHORIA DOS PROCESSOS

No final da Fase 1 espera-se que a empresa opere seus processos de forma sistêmica, possuindo evidência objetiva da qualidade produzida. Uma empresa que está nessa condição se diz que está no “Estágio 2” (Tabela 3).

Tabela 3 - Características da empresa situada no “Estágio 2” da qualidade

Qualidade	Política da qualidade	Parcialmente definida
	Manual da Qualidade	Não existe
	ISO 9000	Empresa preparada
	Indicadores	Utiliza indicadores internos de qualidade
Funcionários	Treinamento	Produto, processo, qualidade (parcial)
Processo	Procedimentos de trabalhos	Elaborados
	Gestão de processos	Parcialmente baseada em dados
	Retrabalhos	Médio a alto
	Fração não conforme	Estimada
	Inspeção	Visual manual no produto e materiais
	Metrologia	Foco na calibração
Produto	Projeto	Definidos pelo cliente, porém erros de projeto são identificados.
	Materiais	Fornecidos pelo cliente, restringido somente problemas visíveis.
	Complexidade	Competência para montagem de placas de baixa complexidade (até 5000 pontos; menos componentes BGA's).

Uma empresa que apresenta as características listadas na tabela acima já implantou uma cultura mínima da qualidade. A sua equipe de funcionários será capaz de analisar o layout de uma placa e planejar o processo, operar o processo segundo instruções documentadas e analisá-lo através de ferramentas simples da qualidade e das informações obtidas em inspeções, testes e históricos de reclamações dos clientes. A taxa de defeitos será razoavelmente estável, tendo diminuído como consequência da organização das tarefas.

No entanto, na Fase 1 não foram realizados esforços específicos para minimizar a taxa de defeitos ao valor mínimo consistente com o nível dos

equipamentos operados pela empresa. Conseqüentemente, a estratégia da Fase 2 baseia-se na implantação de controle estatístico de processo, visando diminuir o risco de produzir placas com defeitos. Para implementar essa estratégia acrescenta-se ao sistema criado durante a Fase 1 as ferramentas e métodos listados na Figura 32.

	FASE 1	FASE 2	FASE 3
DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	DFM		DFT
DESENVOLVIMENTO E PLANEJAMENTO DO PROCESSO	Fluxograma		
	Procedimentos		
	Diagrama Pareto		
	Diagrama causa-efeito		
	Treinamentos		
	Plano de controle		
	Plano de reação		
		PFMEA	DOE
PRODUÇÃO	Diário de bordo		
	Folha de verificação		
	Rastreabilidade		
	Manutenção		
		CEP	Aquisição automática dos dados de produção
INSPEÇÃO E TESTE	Manual Visual		
		AOI	AXI
	Funcional		
			ICT Aquisição automática dos dados de inspeção
ASPECTOS METROLÓGICOS	Calibração		
		GR&R	
INDICADORES	DPMO (IPC-7912)		
		DPMO (IPC-9261)	
	Índice Complexidade		Cp e Cpk Índice Produtividade
ESTÁGIO 1	ESTÁGIO 2	ESTÁGIO 3	ESTÁGIO 4

Figura 32 – Conjunto de métodos e ferramentas da qualidade adicionados na Fase 2

Na Fase 2, o controle estatístico de processos é flanqueado pelas ferramentas da qualidade utilizadas por empresas certificadas ISO/TS 16949 ^[44]. O PFMEA, aplicado durante o planejamento do processo, permitirá reduzir a probabilidade de falhas acontecerem, mas também consolidará a implantação da cultura da engenharia simultânea na empresa. A melhoria dos métodos de inspeção,

dada a partir da inspeção óptica automatizada, aumentará a confiabilidade e velocidade de inspeção, mas não necessariamente a capacidade de detectar falhas que não podem ser identificadas a olho nu.

Assim, os objetivos específicos fixados para esta fase são:

- implantação da ISO 9000;
- qualificação dos fornecedores;
- implantação da gestão estatística de processos;
- diminuição progressiva do retrabalho e refugo e o aumento da qualidade;
- melhoria da eficiência de inspeção;
- redução da taxa de defeitos para abaixo de 320 ppm.

Vale ressaltar que a certificação ISO 9000 é importante para empresa aumentar seu prestígio no mercado e se posicionar como fornecedor de clientes de médio e grande porte. No entanto, essa certificação deve ser considerada como uma opção da empresa e não como uma necessidade do sistema de garantia da qualidade. Apesar disso, a sistemática proposta nesta dissertação está baseada nos oito princípios básicos de um sistema de gestão da qualidade moderno, que são^[43]:

- foco no cliente;
- liderança;
- envolvimento das pessoas;
- abordagem de processos;
- abordagem sistêmica para gestão;
- melhoria contínua;
- abordagem factual para tomada de decisões;
- benefícios mútuos na relação com fornecedores.

Assim, pode-se afirmar que as atividades das Fases 1 e 2 fornecem as bases conceituais para a certificação ISO 9000, porém elas omitem um conjunto de tarefas que seriam necessárias para efetivamente certificação, tais como: a redação do manual da qualidade, a implantação do sistema em áreas não produtivas e assim

por diante. Essa omissão é devido a ponto de a certificação do sistema de qualidade estar fora do escopo da dissertação.

4.2.1 Metodologia de implantação da Fase 2

A seguir será detalhada a metodologia de implantação das atividades propostas pela Fase 2, apresentadas na ordem em que aparecem nos ciclos da Figura 29 e Figura 30, válidos também para esta fase.

4.2.1.1 Planejamento e definição do processo

Nesta fase, o foco das ações deve ser para prevenção de falhas de processo. As responsabilidades da equipe de desenvolvimento do processo serão:

- aprimorar o manual de DFM e promover continuamente sua difusão e utilização pelos clientes;
- desenvolver e implantar o uso de PFMEA e aplicá-lo às placas selecionadas;
- revisar os planos de controle e os planos de reação, incorporando as novas tecnologias de inspeção e as informações sobre criticidade geradas pela aplicação de PFMEA;
- planejar e implantar o controle estatístico de processos nas características especiais de produto e processo;
- planejar e implantar a análise dos meios de medição;
- gerar os novos procedimentos e instruções de trabalho e aprimorar os já gerados na Fase 1.

Durante a Fase 2, pode-se esperar que a complexidade das placas montadas pela empresa aumente, estando a mesma preparada para montar no final desta fase placas de média complexidade com níveis de defeito aceitáveis. Isso impõe novas exigências sobre a aplicação de projeto para fabricação DFM, já que a montagem de placas mais complexas, projetadas sem levar em conta as regras do DFM, podem levar a empresa montadora novamente ao estágio dos retrabalhos massivos, com a conseqüente perda econômica e de mercado. Por isso, é importante que a cultura do DFM seja consolidada na empresa e difundida ainda mais entre seus clientes

através do manual de DFM e de assessorias, quando necessário. Caso ocorra que o projeto da placa não esteja dentro do esperado, a equipe de produção deverá solicitar a adequação do projeto. Se não for possível modificar o projeto da placa, previsões deverão ser tomadas para advertir ao cliente dos problemas que serão ocasionados no processo de montagem, orçando adequadamente o custo associado aos retrabalhos decorrentes.

O PFMEA é uma ferramenta fundamental para diminuir o risco de produzir placas com defeitos. Sua aplicação na Fase 2 é possibilitada pela acumulação de conhecimento e informação produzida durante a Fase 1. Como recomendado pelo método, as sessões de PFMEA devem incluir representantes de diversos setores, com competências adequadas. As informações da Fase 1 podem ser usadas como base para a listagem dos modos potenciais de falhas e cálculo dos índices de ocorrência e detecção e dos riscos das falhas, devendo-se realizar ações efetivas para diminuir os riscos de falhas sempre que o valor seja maior de 50. A partir destes resultados, os planos de controle podem ser revisados. Os controles de processo, inspeções ou testes deverão ser acrescentadas quando o risco potencial de produzir placas com defeitos de montagem seja ainda alto, após o esforço de melhoria demandado pelo PFMEA. Inversamente, poderão ser diminuídos ou eliminados os controles quando o risco se mostre inexpressivo. Porém, essas decisões devem ser tomadas com extremo cuidado, já que o acréscimo de controles desnecessários irá afetar os custos e a retirada de controles necessários afetará a qualidade. Por isso, antes de tomar essas decisões com base nos resultados do PFMEA, é importante realizar uma análise crítica do comportamento do processo durante a Fase 1.

Deve-se observar que a natureza dos processos envolvidos na montagem de placas faz com que o número de PFMEAs que é necessário ser realizado seja restrito. Estes PFMEAs poderão ser aplicados a famílias de placas, permitindo um efeito multiplicador do esforço.

Outra responsabilidade importante da equipe de planejamento é a implantação do controle estatístico de processos. Sempre será preferível, especialmente nos inícios do programa, manter um número relativamente baixo de características sob CEP. É pouco provável que na Fase 2 a empresa conte com a estrutura necessária para monitorar e analisar um número relativamente alto de

gráficos de controle. Por cada gráfico gerado, mas não analisado, perde-se valor, afetando a credibilidade do programa. Para selecionar adequadamente os característicos de produto e processo nos quais se aplicará a ferramenta, devem ser aproveitados os resultados do PFMEA e analisados os históricos da qualidade e diários de bordo acumulados durante a Fase 1.

Um erro comum que deve ser evitado é a suspensão do CEP quando um característico encontra-se sob inspeção 100%. Trata-se de duas operações de controle com propósitos diferentes: o CEP visa manter o processo estável e, conseqüentemente, visa atingir a previsibilidade; a inspeção 100% permite segregar o produto defeituoso, sem fornecer informação útil para o controle e melhoria.

Outro aspecto importante é a correta seleção do tipo de gráfico de controle. Característicos de tipo atributo (ex: quantidade de defeitos por placa) podem ser controlados usando o gráfico-*u*. Característicos monitorados por medição (ex: temperaturas de solda, viscosidade da pasta de solda), podem ser controlados usando gráficos de valores individuais e amplitude móvel (X-mR) ^[36] ou de média e amplitude (Xbar-R) ^[36]. O primeiro é particularmente adequado durante o processo de implantação, quando é necessário produzir resultados de impacto com pequeno esforço e mantendo baixa a complexidade da ferramenta.

Durante a Fase 2, também devem ser implantados os estudos de repetitividade e reprodutibilidade dos processos de medição e inspeção. A calibração dos meios de medição não é suficiente para conseguir o ajuste e controle dos processos de montagem. É preciso também verificar se os equipamentos de medição são capazes de detectar a variação da grandeza medida e se os operadores estão operando estes instrumentos de forma consistente. Por isso, devem ser realizados estudos de GR&R com todos os operadores que utilizam os meios de medição para controlar as variáveis do produto e processo que afetam na qualidade do produto, e caso houver necessidade, treinar os operadores e/ou adquirir novos equipamentos. O mesmo estudo deve ser conduzido para os operadores que controlam os atributos do produto e processo (ex: presença de defeitos). Infelizmente, os estudos de GR&R para dados de atributos precisam de amostras relativamente grandes de produto (entre 20 e 50 placas). Apesar disso, deve-se salientar que sem realizar estes estudos não é possível conhecer qual é a efetividade da inspeção visual manual sobre a qualidade do produto: não é razoável

dispensá-los. De todas as formas, a regra enunciada durante o tratamento de CEP vale também para os estudos de GR&R: quanto menos estudos sejam feitos, maior probabilidade de que exista tempo livre para aplicá-lo a tarefas de melhoria.

Os esforços dispensados na fase anterior devem continuar nesta fase, os treinamentos devem ser mantidos, contudo, o enfoque nesta fase deve ser para ferramentas mais avançadas da qualidade e para o controle estatístico do processo. Os procedimentos, plano de controle e demais documentos devem ser revisados e aprimorados. Além disso, a análise dos dados de processo deve continuar ocorrendo, a fim de saber a reação do processo e para continua atualização do PFMEA e do plano de controle.

4.2.1.2 Produção

Nesta fase, o pessoal de gerenciamento do processo deve implementar as melhorias do sistema de garantia da qualidade definidas durante o planejamento do processo. A seguir as responsabilidades decorrentes:

- operacionalizar o CEP na linha de montagem;
- realizar os estudos de GR&R;
- auxiliar o pessoal de desenvolvimento do processo na elaboração e revisão dos documentos (PFMEA, plano de controle, plano de reação, fluxogramas);
- auxiliar o pessoal de análise da qualidade, fornecendo dados e informações confiáveis nos quais possa se basear o esforço de melhoria.

As responsabilidades do setor produção no que diz respeito a CEP e GR&R são principalmente operacionais. Antes de iniciar a produção, devem ser criadas as instruções de trabalho necessárias para implementar as inspeções, controles e testes detalhados no plano de controle. Os operadores deverão ser treinados para execução dessas inspeções e testes, e também para preenchimento e interpretação dos gráficos de controle. Devem-se focar na identificação e eliminação das causas especiais de variação e na eliminação do sobre-ajuste. Recomenda-se começar o processo de implantação do CEP usando regras de detecção simples, passando à aplicação de regras mais complexas somente quando for necessário e a cultura do CEP estiver internalizada. Assim, pode-se começar usando a regra de Shewhart ^[36]

(ponto fora dos limites de controle três-sigma), mantendo essa estratégia até que os sinais de fora de controle sejam escassos, gerando assim, a necessidade de aumentar a sensibilidade do gráfico de controle. A partir desse momento e dependendo do grau de formação dos operadores, pode-se adicionar somente a regra corrida de 8 pontos por baixo ou por cima da linha média ou, diretamente, adotar as regras da Western Electric ^[36].

Os planos de reação devem ser usados para ajudar e agilizar na resolução dos problemas do processo. Toda vez que acontecer do processo estar fora de controle, a produção deve ser interrompida imediatamente, reiniciando-a quando o problema for identificado e corrigido. Unicamente pode-se operar o processo fora de controle quando se carece de uma solução imediata para o problema e a capacidade do processo permite operar fora de alvo sem demérito da qualidade. Com isto, pretende-se nesta fase atingir a estabilidade do processo, reduzindo cada vez mais a variabilidade e, conseqüentemente, melhorando a qualidade produzida.

A partir desta fase a inspeção de entrada será mais rigorosa. Esta deve ocorrer nos insumos das máquinas (pasta de solda, fluxo, adesivo); nos componentes, neste caso deve ser avaliada a geometria e as características elétricas dos componentes (aqueles que forem possíveis, exemplo: resistor, diodo, capacitor); nas placas de circuito impresso nuas. Para evitar a incidência de falhas a empresa montadora deve adquirir materiais e insumos somente de fornecedores confiáveis e homologados. Para auxiliar este tipo de inspeção é recomendada a utilização das normas: IPC-MI-660 ^[82], IPC-A-600F ^[83], J-STD-004 ^[84] e J-STD-005 ^[85].

Nesta fase é recomendada a incorporação da inspeção óptica automática (AOI). Isso trará duas vantagens fundamentais para a operação do sistema de garantia da qualidade: o aumento na cobertura de defeitos e a diminuição do tempo entre o momento em que o problema acontece e o momento em que é solucionado. A inclusão de um sistema de AOI pode requerer a realização de algumas mudanças no sistema de confirmação da inspeção. Máquinas de inspeção automatizadas não são afetadas pelo operador. Assim, não será necessário avaliar a dimensão de reprodutibilidade, mas sim a de repetitividade, neste caso deve-se entender como: a capacidade da máquina de concordar com ela mesma, em avaliações repetidas da mesma placa.

A etapa de testes nesta fase permanece da mesma forma que na fase anterior, ou seja, após o processo de montagem as placas devem passar por testes funcionais.

4.2.1.3 Análise da qualidade

Como na Fase 1, o pessoal de análise da qualidade é responsável pela melhoria contínua do sistema de garantia da qualidade. A operacionalização do CEP traz algumas tarefas adicionais às já iniciadas na fase anterior:

- analisar o estado dos processos, usando para isso os gráficos de controle preenchidos na produção;
- monitorar o andamento dos programas de CEP e de análise dos processos de medição, inspeção e teste;
- propor melhorias no processo, nos procedimentos, instruções de trabalho e nas ferramentas de coleta de informação;
- calcular os indicadores da qualidade e propor ações de melhoria.
- colaborar com a implantação da análise preventiva de risco de defeitos, participando ativamente nas sessões de PFMEA;
- apoiar o pessoal da produção na melhoria dos processos e do sistema de garantia da qualidade *on-line*.

Os gráficos de controle preenchidos na produção contêm muita informação que pode ser aproveitada numa segunda instância, quando a produção de um determinado lote já acabou. Trata-se da informação sobre a presença de causas estruturais de variação, sobre causas especiais recorrentes, sobre problemas crônicos em determinada máquina ou equipamento. Estes problemas fogem da análise dos operadores, realizada em tempo real durante o processo de montagem e orientada principalmente à identificação da presença de causas especiais e à regulagem dos processos. Cria-se assim um segundo laço de controle da qualidade, no qual a informação gerada pelo CEP é interpretada sob o ponto de vista das melhorias de médio e longo prazo. Desta análise pode resultar, por exemplo, uma solicitação de manutenção, uma mudança na velocidade de inserção, a decisão de mudar de fornecedor de um determinado material ou insumo, e assim por diante.

Os gráficos de controle também são portadores de informação implícita que permite qualificar as decisões tomadas durante o planejamento do programa, tais como: a adequação do gráfico selecionado, a frequência de inspeção, o tamanho de subgrupo. Quando analisados junto com os diários de bordo e outros registros da produção, também permitem identificar as más práticas, distorções introduzidas pelos operadores, problemas de treinamento. Toda essa informação deve ser explicitada e analisada pela equipe de análise da qualidade, para, se for necessário, realizar ajustes no programa de CEP.

O mesmo acontece no que diz respeito à adequação dos meios de inspeção, medição e teste. Evidências sobre resolução insuficiente, diferenças de comportamento entre operadores e outros aspectos críticos pode ser obtida a partir da análise criteriosa dos gráficos de controle. Essa informação, associada à gerada durante os estudos de GR&R e na calibração dos equipamentos, deverá ser suficiente para decidir sobre a necessidade de induzir melhorias nos meios de inspeção, medição e teste.

O cálculo do DPMO, utilizando a norma IPC-7912^[87], e o cálculo do índice de complexidade devem ser mantidos nesta fase. Contudo, será introduzida uma nova sistemática de cálculo do DPMO baseada na norma IPC-9261^[88]. Esta norma tem o objetivo de medir o DPMO das etapas do processo, ao invés do produto final. O grande benefício do uso dessa metodologia é a possibilidade de identificar as etapas mais críticas do processo, às quais devem ser dispensados os maiores esforços, como também monitorar se as ações de melhoria estão sendo eficazes^[95].

4.2.1.4 Normas e recomendações

As principais normas e recomendações que auxiliam na realização da Fase 2 são:

- Desenvolvimento do processo e produção

IPC-MI-660^[82], IPC-A-600F^[83], J-STD-004^[84], J-STD-005^[85], IPC-7530^[70],
IPC-TR-460A^[71], IPC-S-816^[72].

- Gestão da qualidade

IPC-9261^[88], ISO/TS 16949^[44].

4.2.2 Considerações finais sobre a Fase 2

Os resultados esperados no final desta fase são:

- processo estável e controlado;
- taxas de defeitos reduzidas;
- Rendimento da produção melhorado;
- métodos de medição, fabricação e teste melhorados;
- modos de falhas de processo conhecidos.

A Fase 2 está prevista para ser finalizada em torno de um ano. Nesta fase é esperado que a empresa aumente mais significativamente a lucratividade dos seus serviços, pois os custos de não-qualidade deverão reduzir e a produtividade aumentar, principalmente pela diminuição da taxa de defeitos. No entanto, é necessário que a empresa esteja empenhada na utilização e domínio das ferramentas da qualidade propostas, destacando-se o plano de controle, o PFMEA e o CEP. Se o estado de controle estatístico for alcançado, a variação dos processos será a mínima consistente com o nível de investimento, sendo que para continuar a redução dos defeitos, será necessário investir em novos materiais, equipamentos e máquinas de produção.

Um outro ponto a ser ressaltado é com relação às máquinas de inspeção óptica automática. O custo de uma máquina de inspeção AOI pode variar entre US\$ 100.000 e US\$ 225.000, o qual pode ser excessivo para uma pequena empresa. Porém, não é possível melhorar a qualidade de produto nem aumentar a produtividade se não se dispõe de sistemas de inspeção capazes de detectar os defeitos com maior confiabilidade que a inspeção visual manual. A decisão de investir numa máquina de AOI deve estar sustentada pela possibilidade de atingir novos clientes e mercados com demandas mais elevadas de qualidade de montagem.

Cabe destacar que durante esta fase deve acontecer a certificação da empresa segundo a norma ISO 9000. Como já foi adiantado no início da seção 4.2, as tarefas decorrentes desta certificação devem ocorrer de forma paralela à realização da Fase 2 e ficam fora do escopo desta dissertação.

4.3 FASE 3 OU FASE DE OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS

A Fase 3 é onde existem os maiores desafios, tendo como objetivo capacitar a empresa a montar quaisquer tipos de placas de circuito impresso, inclusive placas de alta complexidade⁵, com a mínima taxa de defeito. Para implantação desta fase é esperado que a empresa possua um sistema da qualidade definido e implantado, seu processo operando de forma estável e controlado com uma reduzida taxa de defeitos e os funcionários qualificados e comprometidos com as boas práticas de projeto e processo, sendo que estas características devem ser atingidas no final da Fase 2. Uma empresa nesta condição encontra-se no “Estágio 3” da qualidade (Tabela 4).

Tabela 4 - Características da empresa situada no “Estágio 3” da qualidade

Qualidade	Política da qualidade	Definida
	Manual da Qualidade	Elaborado
	ISO 9000	Implantada
	Indicadores	Utiliza indicadores internos e externos de qualidade
Funcionários	Treinamento	Produto, processo e qualidade
Processo	Procedimentos de trabalhos	Elaborados
	Gestão de processos	Implantada
	Retrabalhos	Reduzidos
	Fração não conforme	Conhecida e estável
	Inspeção	Óptica automática no produto e métodos específicos para materiais de entrada
	Metrologia	Estudo de capacidade dos meios de medição implantado
Produto	Projeto	Cliente comprometido na diminuição dos erros de projeto pela aplicação de DFM
	Materiais	Aceitos somente de fornecedores homologados
	Complexidade	Competência para montagem de placas de média complexidade (até 15000 pontos; menos componentes BGA's)

⁵ **Placa de alta complexidade** – é definida como uma placa com mais de 3000 nós e/ou 15000 juntas de solda, destinadas para uma aplicação de alta confiabilidade ^[57].

Nesta fase grandes investimentos podem ser necessários, montar placas complexas requer meios de inspeções e testes sofisticados e equipamentos e máquinas extremamente capazes. A Fase 3 caracteriza-se pela atualização das máquinas de produção, inspeção e testes e pela informatização das operações, permitindo aumentar a cobertura dos defeitos e elevar a eficiência na montagem e no processamento das informações visando a melhoria da qualidade. Durante sua execução são acrescentados os métodos e ferramentas listadas na Figura 33.

	FASE 1	FASE 2	FASE 3
DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	DFM		DFT
DESENVOLVIMENTO E PLANEJAMENTO DO PROCESSO	Fluxograma		
	Procedimentos		
	Diagrama Pareto		
	Diagrama causa-efeito		
	Treinamentos		
	Plano de controle		
	Plano de reação		
		PFMEA	DOE
PRODUÇÃO	Diário de bordo		
	Folha de verificação		
	Rastreabilidade		
	Manutenção		
		CEP	Aquisição automática dos dados de produção
INSPEÇÃO E TESTE	Manual Visual		
		AOI	AXI
	Funcional		ICT
			Aquisição automática dos dados de inspeção
ASPECTOS METROLÓGICOS	Calibração		
		GR&R	
INDICADORES	DPMO (IPC-7912)		
		DPMO (IPC-9261)	
	Índice Complexidade		Cp e Cpk Índice Produtividade
ESTÁGIO 1	ESTÁGIO 2	ESTÁGIO 3	ESTÁGIO 4

Figura 33 – Conjunto de métodos e ferramentas da qualidade adicionados na Fase 3

Os objetivos específicos desta fase são:

- modernização e atualização do processo;
- melhoria nos métodos de inspeção e testes;
- abertura de novos mercados para a empresa com a montagem de placas mais complexas;
- minimização do refugo e retrabalho e, conseqüentemente, das reclamações dos clientes;
- taxa de defeitos igual ou menor que 64 ppm.

Nesta fase, caso a empresa execute serviços para empresas automotivas, é importante que seja buscada a certificação ISO/TS 16949 ^[44], sendo que grande parte dos pré-requisitos técnicos necessários para esta certificação já foram implementados nas Fases 1 e 2, porém, assim como a certificação ISO 9000, as tarefas específicas para alcançar a certificação ISO/TS 16949 ^[44] ficam fora do escopo desta dissertação.

4.3.1 Metodologia de implantação da Fase 3

A seguir será detalhada a metodologia de implantação das atividades propostas pela Fase 3, utilizando o mesmo conceito aplicado nas fases anteriores.

4.3.1.1 Planejamento e definição do processo

As ações desta fase focalizam-se para a execução de experimentos, estudo de capacidade das máquinas, atualização das técnicas de inspeção e teste e pela informatização dos dados da qualidade e produtividade, sendo que as responsabilidades do pessoal de desenvolvimento do processo são:

- promover a aplicação da metodologia do DFT (projeto para teste) pelo cliente e também no âmbito da própria empresa;
- realizar experimentos com novos materiais e novos parâmetros de máquina, utilizando delineamento de experimentos (DOE);

- especificar meios de inspeção e testes capazes de detectar a maioria dos defeitos potenciais;
- estudar a capacidade dos equipamentos de produção;
- atualizar os procedimentos e instruções de trabalho, adequando os processos às condições de operação melhoradas;
- aumentar a eficiência na operação do sistema de garantia da qualidade (aquisição automática dos dados de produção e inspeção, gráficos de controle on-line).

Nesta fase, além do uso obrigatório das regras contidas no DFM, é necessário adicionar a metodologia de projeto para testabilidade (DFT). Para isto a empresa deverá formar pessoal especializado em layout e testes de placas para:

- interagir com o cliente durante o projeto da placa;
- escolher a melhor estratégia de inspeção e teste para a placa.

Desta forma, durante a etapa de desenvolvimento do produto a empresa montadora deverá oferecer um suporte técnico ao cliente e condições para testes e prototipagem do seu produto na linha de montagem, a fim de garantir que a produção ocorra da forma mais eficiente e confiável possível.

Para as operações de inspeção e teste é necessário aplicar técnicas apropriadas para cada modelo de placa. Como foi abordado no item 3.4.3, não existe uma única técnica que consiga detectar eficientemente todos os defeitos que podem ocorrer numa placa de circuito impresso, portanto, devem ser usadas técnicas complementares para se obter uma maior cobertura dos defeitos. Desta forma, dependendo da complexidade da placa será necessário que a empresa disponha de meios de inspeção modernos e sofisticados, tais como: inspeção por Raios-X (AXI) e inspeção óptica automática (AOI). Os métodos e os procedimentos de inspeção vão variar de acordo com as configurações da placa e o volume da produção. Para a etapa de testes é importante que a empresa disponha do teste de circuito (cama-de-pinos ou *fly-prober*). O teste de circuito é utilizado para encontrar os defeitos que não foram detectados anteriormente pelos métodos de inspeção. Além disso, alguns tipos de defeitos que os testes de circuito são capazes de

detectar (componente invertido e curto) podem danificar a placa, caso estes não forem removidos antes do teste funcional final da placa.

O delineamento de experimentos (DOE) será introduzido nesta fase com o objetivo de conseguir o ótimo ajuste do processo, para a determinação parâmetros dominantes e para testes de novos materiais. Este deve ser aplicado primeiramente aos processos mais críticos, aqueles que são mais propensos a gerarem defeitos. O DOE deverá ser aplicado sempre que seja necessário, usando-o como ferramenta para induzir a melhoria contínua da qualidade. As mudanças no processo devem ser sistematizadas atualizando os documentos do sistema de garantia da qualidade, selecionando novos fornecedores, etc.

A montagem de componentes muito pequenos ou com terminais muito próximos, exigem máquinas que operem com grande exatidão, portanto, é necessário verificar se as máquinas disponíveis na empresa possuem a capacidade adequada. Para isto, devem ser executados estudos de capacidade das máquinas, principalmente para as máquinas de inserção de componentes SMT e aplicação de pasta de solda e, caso estas não atendam os requisitos, executar tarefas de ajuste, *up-grades* ou adquirir máquinas mais capazes. Para guiar o estudo de capacidade das máquinas de inserção SMT existe a norma IPC-9850 ^[79], contendo procedimentos de medição e metodologias para especificação, avaliação e verificação contínua.

O processamento das informações deverá ser um outro ponto de atenção nesta fase. Para que as causas ou as oportunidades de defeitos possam ser identificadas o mais rapidamente possível, e ações de correção ou contenção sejam tomadas, é necessária uma alta eficiência na coleta e análise dos dados. Para isto, nesta fase é recomendada a criação de uma interface (hardware e/ou software) para aquisição automática dos dados de inspeção e produção. Os dados podem ser coletados nas máquinas de produção, equipamentos de inspeções e testes, sensores, leitores de código de barras, computadores inseridos na linha. Com os dados informatizados tornam-se possível criar grandes facilidades dentro da empresa, como por exemplo: cartas de controle on-line, rastreabilidade das placas e dos componentes, determinar o tempo real de montagem da placa, o número de componentes descartados, o tempo de máquina parada, possuir uma base de dados dinâmica para soluções de problemas do processo. Além disso, a empresa pode

possuir um canal de comunicação via Internet, permitindo um contato *on-line* com os clientes, os quais poderão indicar os defeitos encontrados em campo, permitindo assim uma rápida tomada de ações. Um sistema informatizado auxiliará no aumento da qualidade e produtividade, além de criar um grande diferencial para empresa no mercado.

4.3.1.2 Produção

As responsabilidades do pessoal de gerenciamento do processo para esta fase são:

- implantar novos sistemas de inspeção e testes;
- implantar sistema de aquisição de dados melhorados (automatizados);
- intensificar treinamento dos operadores (produto, processo, inspeção, testes e qualidade).

A minimização dos defeitos nas placas de circuito impresso requer um rigoroso controle de processo e uma eficiente cobertura de defeitos. Durante a montagem de placas complexas ou de alta confiabilidade esta situação agrava-se ainda mais, pois variações ou desajustes no processo podem inutilizar a placa ou tornar seu retrabalho muito difícil e demorado. Portanto, na Fase 3 é necessário que durante a produção o CEP esteja bem difundido dentro da empresa, de modo que o processo possa ser ajustado e controlado de forma eficiente. Um efetivo plano de manutenção e conservação dos equipamentos e máquinas produtivas deve estar implantado, a manutenção preditiva pode ser incluída nesta fase, os meios de medição calibrados e capazes de detectar as variações do produto e processo e os funcionários treinados para executarem suas atividades.

Os novos sistemas de inspeção e testes, definidos durante o planejamento do processo, devem ser implantados, o que será necessário gerar novas instruções de inspeção, a partir do plano de controle, e treinar os funcionários.

O sistema de aquisição automática dos dados de produção e inspeção deverá proporcionar uma grande agilidade na correção do processo ou, no pior caso, na contenção dos produtos defeituosos, para isto, é imprescindível que os operadores

estejam treinados para operarem este sistema e para executarem intervenções no processo quando necessário.

4.3.1.3 Análise da qualidade

O pessoal de análise da qualidade deverá colaborar nas atividades de atualização do processo e informatização das operações. Deverá também:

- identificar e priorizar os problemas da qualidade e produtividade;
- eliminar os modos de falhas do processo;
- intensificar a difusão dos métodos e ferramentas da garantia da qualidade.

Com a informatização das informações, os dados gerados durante o processo produtivo serão muito mais dinâmicos e volumosos, o pessoal de análise da qualidade deverá ser capaz de filtrar as informações realmente significativas e úteis, a fim de que ações sejam tomadas imediatamente.

Os resultados de minimização dos defeitos e aumento da produtividade devem ser verificados continuamente. Para esta fase além dos indicadores da qualidade é proposto o uso dos indicadores de produtividade. O índice proposto para ser utilizado para medir a eficiência da montagem é o índice de produtividade. Este índice dá a indicação de quanto tempo na verdade está sendo dispensando para a produção das placas. Ele é formado pelo produto de dois indicadores: utilização de máquina e eficiência de montagem. O cálculo do índice de produtividade é mostrado na Equação 4.

$$PRODUTIVIDADE = \frac{\text{TempoUtilizaçãoMáquina}}{\text{TempoDisponívelMáquina}} \times \frac{\text{TempoPadrãoMontagem}}{\text{TempoEfetivoMontagem}} \times 100 \quad (4)$$

Os outros indicadores recomendados para esta fase são os índices de capacidade. Os índices de capacidade C_p e C_{p_k} podem ser usados para verificar a capacidade das máquinas de produção, principalmente para as máquinas de inserção de componentes SMT ^[96], que nesta fase devem ser extremamente capazes.

Vale ressaltar que os métodos e atividades executados nas fases anteriores devem continuar nesta fase. Todas ações recomendadas no PFMEA para reduzir o risco da falha devem ser executadas, se possível, e os resultados avaliados. Os

documentos devem ser atualizados e aprimorados e os funcionários treinados e aperfeiçoados continuamente.

4.3.1.4 Normas e recomendações

As principais normas e recomendações que auxiliam na implantação da Fase 3 são:

- Desenvolvimento do produto
IPC-7095 ^[68].
- Desenvolvimento do processo e produção
J-STD-013 ^[69], IPC-9701^[86], IPC-9850 ^[79].

4.3.2 Considerações finais sobre a Fase 3

Os resultados esperados no final desta fase são:

- máquinas e equipamentos de produção capazes;
- métodos de inspeção e testes capazes e eficientes;
- gestão da qualidade e produtividade informatizada;
- competência na montagem de todos os tipos de placas, com a mínima taxa de defeitos.

Estima-se que a implantação da Fase 3 pode levar de um a três anos. Um dos maiores obstáculos para esta fase é o custo. Adquirir novos meios de inspeção e teste e atualizar as máquinas e equipamentos de processos e informatizar os dados de inspeção e produção pode ser um investimento muito alto para uma empresa.

No entanto, com a implantação da Fase 3 cria-se um grande diferencial de mercado para a empresa. Após o seu término espera-se atingir o “Estágio 4” da qualidade (

Tabela 5). Uma empresa que se encontra neste estágio seria capaz de montar placas de circuito impresso de baixa, média e alta complexidade com eficiência e qualidade.

Tabela 5 - Características da empresa situada no “Estágio 4” da qualidade

Qualidade	Política da qualidade	Definida
	Manual da Qualidade	Elaborado
	ISO 9000	Implantada
	ISO/TS 16949	Implantada (se necessário)
	Indicadores	Utiliza indicadores internos de qualidade e de produtividade e indicadores externos de qualidade
Funcionários	Treinamento	Produto, processo, testes e qualidade.
Processo	Procedimentos de trabalhos	Elaborados
	Gestão de processos	Implantado
	Retrabalhos	Mínimos
	Fração não conforme	Mínima e previsível
	Inspeção	Inspeção por Raios-X e óptica automática no produto, testes com cama de pinos ou <i>flying prober</i> e métodos específicos para materiais de entrada
	Metrologia	Foco no estudo de capacidade dos meios de produção
Produto	Projeto	Projeto envolvendo engenharia simultânea, realizado seguindo normas.
	Materiais	Aceitos somente de fornecedores homologados
	Complexidade	Competência para montagem de placas de alta complexidade (acima 15000 pontos)

As empresas brasileiras montadoras de placas circuito impresso no “Estágio 4” da qualidade devem estar em condições de se tornarem concorrentes diretas das principais empresas montadoras de placas existentes no mundo.

Vale ressaltar que principalmente a partir da Fase 3 os clientes podem ser muito mais exigentes e os contratos de manufatura serem de maior risco. Desta forma, a responsabilidade da empresa em entregar produtos com qualidade e confiabilidade é muito grande. Por isso, além de todos os testes citados na Fase 3, devem ser levados em consideração os ensaios de confiabilidade. Esses ensaios são usados principalmente durante o desenvolvimento do produto ou durante a fase de ajustes do processo, porém, as características, os detalhes e a importância exata destes ensaios com a sistemática proposta não foram abordados no conteúdo desta

dissertação, sendo que informações pertinentes a este assunto podem ser obtidas na referência ^[97].

4.4 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A SISTEMÁTICA APRESENTADA

Neste capítulo foi apresentada uma sistemática para a implantação da garantia de qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso. Essa sistemática foi desenvolvida tomando como base material bibliográfico de qualidade reconhecida. No entanto, como todas as sistemáticas, é somente uma visão simplificada da realidade, sendo esta muito mais complexa e rica em detalhes que podem invalidar alguma das suposições feitas no decorrer do trabalho. Em particular, a adaptação às condições de produção e mercadológicas brasileiras precisa ser comprovada. Por essa razão, a validação final da sistemática somente será possível após uma aplicação da mesma em empresas com distinto grau de maturidade no que diz respeito à garantia da qualidade. No próximo capítulo será mostrada a implementação da Fase 1 numa empresa montadora de placas de circuito impresso.

5 UM ESTUDO DE CASO: IMPLANTAÇÃO INFORMATIZADA DA FASE 1 DA SISTEMÁTICA NO LABELECTRON

A aplicação dos conceitos elaborados nos capítulos anteriores ocorreu na Megaflex Sul, empresa responsável pela operação da planta do LABelectron, Laboratório de Desenvolvimento e Testes de Processos e Produtos Eletrônicos, já apresentado no Capítulo 1. A Megaflex Sul é principalmente uma prestadora de serviços de montagem de placas de circuito impresso, embora colabore também no desenvolvimento de novos produtos. A empresa realiza a montagem de placas com as tecnologias SMT e TH, operando com uma de linha de montagem SMT e uma linha de montagem TH com capacidade para montagem de até 11 milhões de componentes/mês. Detalhes da planta são ilustrados na Figura 34. Como se pode observar nas figuras, o ambiente de trabalho na empresa é limpo e organizado, contando-se com equipamentos razoavelmente modernos e em bom estado de uso. No entanto, como será mostrada no decorrer deste trabalho, essa condição não necessariamente implica maturidade da empresa com relação à garantia da qualidade. Atualmente o volume de produção da Megaflex Sul está em aproximadamente 4 milhões de componentes/mês, atuando com unidades e tipos de produtos variados, sendo que seus clientes variam desde empresas incubadas até grandes empresas.

O objetivo deste trabalho junto à empresa foi definido como a “implantação de um sistema de garantia da qualidade”, visando conhecer e melhorar os processos e produtos da Megaflex Sul.



Linha SMT



Linha TH

Figura 34 - Detalhes da planta da Megaflex Sul

5.1 ESTADO INICIAL DA EMPRESA

Quando se iniciou o estudo de caso, a Megaflex Sul estava recentemente instalada no estado de Santa Catarina, portanto, o nível de qualidade da empresa não era conhecido. Optou-se então por caracterizar preventivamente a empresa como estando no “Estágio 1” da qualidade, e aplicando o *checklist* desse estágio, obteve-se os resultados mostrados na Tabela 6, o qual validou a caracterização preliminar.

Tabela 6 - Características do estágio da qualidade da Megaflex Sul

Qualidade	Política da qualidade	Não definida ou não implantada
	Manual da qualidade	Não existe
	ISO 9000	Não implantada

	Indicadores	Não utiliza
Funcionários	Treinamento	Básico para operação do processo
Processo	Procedimentos de trabalhos	Embrionários / Parciais
	Gestão de processos	Empírica
	Retrabalhos	Massivos
	Fração não conforme	Desconhecida
	Inspeção	Visual no produto
	Metrologia	Não praticada
Produto	Projeto	Definido pelo cliente, alguns erros de projeto questionados.
	Materiais	Fornecidos pelo cliente, aceitos sem restrições.
	Complexidade	Desconhecida

Para dar início ao processo de implantação optou-se pela coleta de dados da produção, dentre todas as atividades propostas pela Fase 1, já que a linha estava rodando e os operadores parcialmente treinados. Para contabilizar os defeitos de montagem foram utilizadas folhas de verificação. Foram contabilizados os defeitos que ocorreram na montagem de quatro modelos de placas de circuito impresso, montadas principalmente na linha TH. Os dados mostraram que a máquina de solda por onda era o responsável pela maioria dos defeitos nas placas. Para alguns modelos de placa, o índice DPMO (IPC-7912 ^[87]) foi de aproximadamente 8000 ppm, sendo o curto o defeito de maior incidência. Uma análise mais detalhada dos defeitos não foi possível, pois as placas não eram identificadas e se misturavam no final da linha, não permitindo reconstruir a seqüência correta dos dados coletados.

Apesar disso, foi iniciado um estudo das causas dos defeitos gerados pela máquina de solda por onda, visando implementar melhorias. No entanto, este estudo não continuou, pois todos os funcionários estavam envolvidos com a produção, não podendo ser alocados para a melhoria do processo.

Em uma outra tentativa de coletar os dados, as placas foram identificadas com um número seqüencial antes de entrar na linha; desta forma, quando inspecionadas era possível reconstruir a ordem de montagem. Além disso, foi introduzido o “Diário de Bordo”, onde era anotada qualquer alteração ou causa especial do processo, indicando a data e a hora da ocorrência, o nome do operador e o número da placa que estava sendo montada no momento. As placas eram

inspecionadas no final da linha e eram anotados os defeitos em “Folhas de Verificação”.

O objetivo destas atividades foi criar uma base de dados da qualidade a cada modelo de placa montada na empresa, para poder avaliar objetivamente o nível de qualidade produzida e identificar os pontos críticos do processo. Contudo, estas atividades não prosseguiram, pois a empresa achou o processo de marcação das placas lento e, adicionalmente não tinha pessoas disponíveis para processar estas informações.

Como descrito nos parágrafos anteriores, uma das principais dificuldades enfrentadas para iniciar a implantação do sistema de garantia da qualidade na empresa foi a falta de tempo dos funcionários, dedicados principalmente à produção. Também se verificou que o número de funcionários qualificados para a elaboração e execução das atividades propostas pela sistemática era reduzido.

Esse impasse levou à necessidade de se pensar uma forma alternativa de implantar o sistema de garantia da qualidade. A solução encontrada foi criar um software para facilitar e agilizar a implantação dos métodos contidos na sistemática, motivando os funcionários a iniciarem as atividades dentro da empresa.

Este software foi desenvolvido na plataforma Microsoft Excel[®], sendo dedicado especialmente para a implantação da Fase 1 da sistemática. Os detalhes e as características deste software serão o restante da discussão a seguir.

5.2 ESTRUTURAÇÃO DO SOFTWARE PARA IMPLANTAÇÃO DA FASE 1

O software apresenta um menu principal composto de ícones que referenciam para um conjunto de documentos necessários para executar a Fase 1. Estes ícones estão dispostos na forma de fluxograma, conforme ilustrado na Figura 35, determinando a seqüência correta para a criação dos documentos, sendo que a maioria destes documentos apresentam um nível de automação que facilitam e agilizam sua preparação.

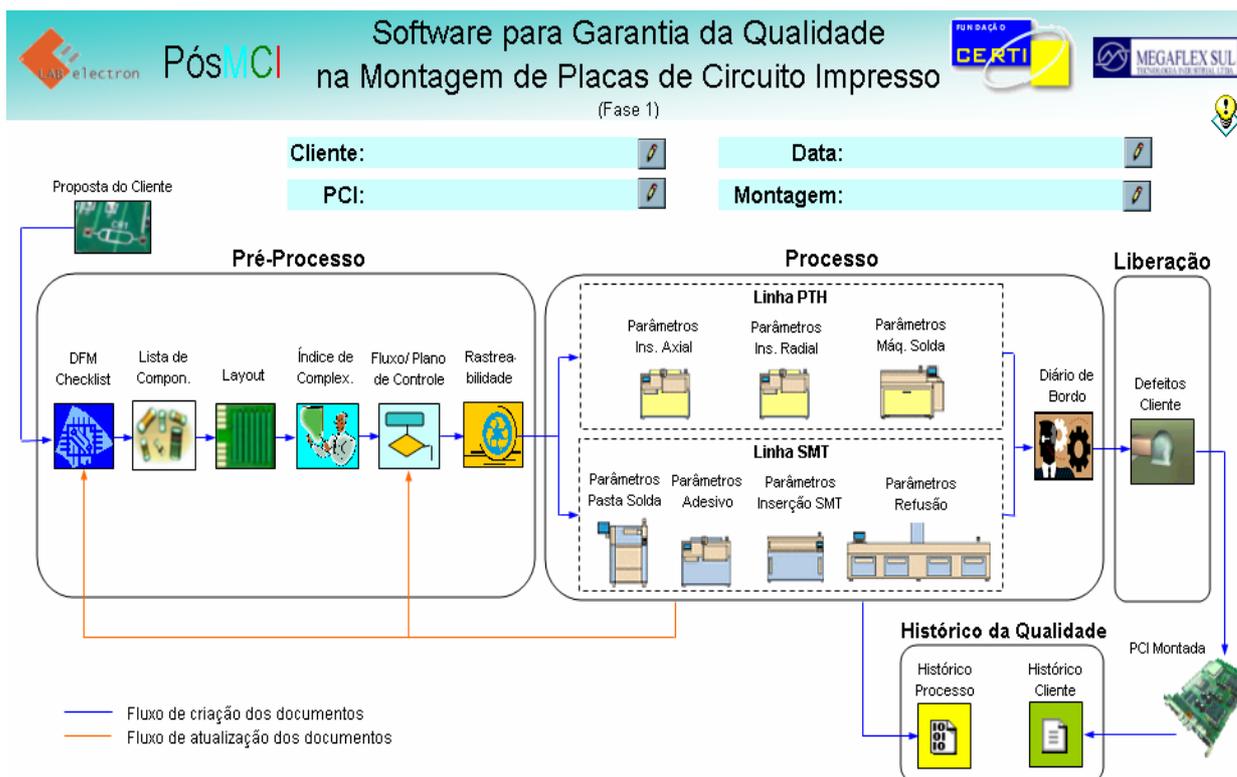


Figura 35 - Menu principal do software para implantação da Fase 1

Foi estabelecida uma divisão em quatro partes principais onde os documentos estão contidos:

1. Pré-processo – são os documentos que devem ser gerados antes da placa entrar em processo de montagem. Estes documentos estão relacionados com as características de projeto da placa, com as instruções e controles necessários para o processo de montagem e com a rastreabilidade das placas. Estes documentos são usados para:
 - garantia preventiva no projeto da placa de circuito impresso;
 - sistematização do processo;
 - planejamento do controle da qualidade;
 - rastreabilidade (interna e externa).
2. Processo – são documentos gerados durante o processo de montagem. Nestes documentos são relatadas todas as modificações e causas especiais que

ocorrem no processo durante a montagem da placa. Além disso, o software informa ao usuário onde foram salvos os arquivos contendo a configuração e a parametrização das máquinas. Estes documentos são usados para:

- agilização do setup;
 - garantia da qualidade na linha (execução da inspeção e coleta de dados);
 - viabilização de análises de causas de defeitos e melhoria contínua do processo;
 - viabilização do controle dos processos.
3. Histórico da qualidade – são documentos gerados durante a inspeção e testes das placas, registrando os tipos e a quantidade de defeitos encontrados. Com estes documentos é possível determinar o índice DPMO da linha e construir o diagrama de Pareto dos defeitos. Estes documentos são usados para:
- avaliação da qualidade do produto;
 - geração de evidência da qualidade para clientes atuais e futuros;
 - orientação da gestão da qualidade;
 - histórico de problemas por realimentação do desenvolvimento da placa;
 - realimentação sobre a efetividade da garantia da qualidade.
4. Liberação – é um documento que deve ser entregue ao cliente para poder recuperar informação sobre os defeitos que não foram detectados durante o processo de montagem. Este documento é usado para:
- planejamento da produção;
 - realimentação sobre a efetividade da garantia da qualidade;
 - assuntos legais e contratuais;
 - identificação de problemas de confiabilidade.

Desta forma, com a utilização do software pretende-se atingir os objetivos propostos pela Fase 1, ou seja, sistematizar as operações dentro da empresa; conhecer o nível de qualidade da montagem e orientar o estudo de melhoria do processo. Cabe ressaltar que as demais atividades propostas pela sistemática que não estão abordados neste software: elaboração de procedimentos, treinamentos, manutenção e calibração, devem ser executadas paralelamente, para uma total efetividade do sistema da qualidade proposto.

5.3 ESTUDO DE CASO UTILIZANDO O SOFTWARE PARA IMPLANTAÇÃO DA FASE 1

Um estudo de caso para verificar a viabilidade e a eficiência do software dentro da empresa ocorreu durante a montagem de um determinado tipo de placa para um cliente da região. O cliente solicitou a montagem de 2000 placas de circuito impresso do mesmo modelo, contendo componentes SMT em apenas uma face (SMT Top). Para sua montagem foi utilizada somente a linha SMT, sendo empregada a técnica de inspeção visual manual durante o processo de montagem e um teste funcional na placa executado pelo cliente. A Figura 36 ilustra o menu principal do software com os dados referentes à placa usada no estudo de caso.

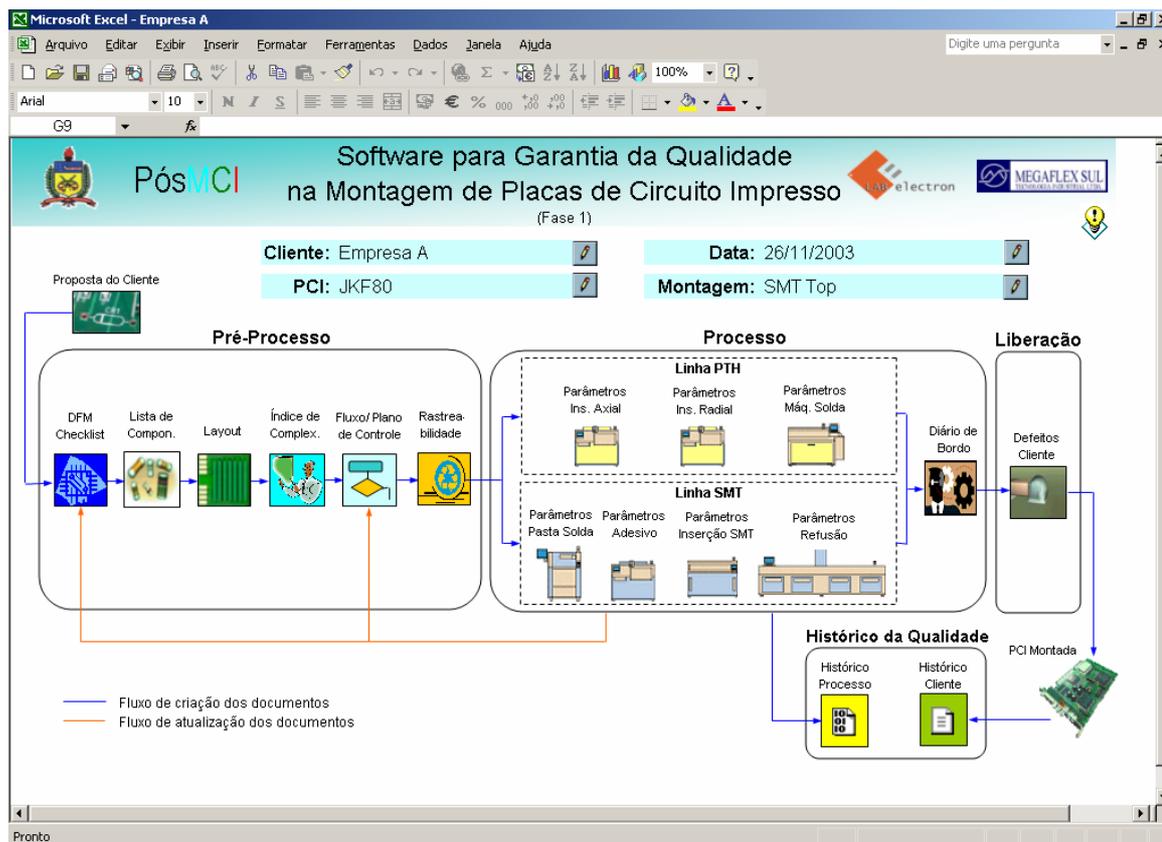


Figura 36 - Menu principal do software com os dados referentes à placa usada no estudos de caso

Para a realização deste estudo de caso os funcionários foram previamente treinados para a operação do software e utilização dos documentos. Os documentos foram criados seguindo a ordem proposta pelo software e os resultados apresentados na forma de uma palestra. Nos subitens a seguir serão detalhados as características do software e os resultados obtidos para este estudo de caso.

5.3.1 DFM checklist

O primeiro documento a ser criado é o *DFM Checklist*. Trata-se de um formulário contendo os itens de configuração da placa que devem ser verificados para ocorrer uma montagem eficiente. Para um correto preenchimento dos campos do formulário foi desenvolvido um manual de DFM, que pode ser consultado diretamente no software. A Figura 37 ilustra o formulário do *DFM checklist* contido no software preenchido de acordo com as configurações da placa.

Microsoft Excel - Empresa A

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

Digite uma pergunta

BB

Menu DFM DIR

Ok Nok Dimensões

Ok Nok Area livre

Ok Nok N Possui Separação/Corte V (Somente painéis)

Ok Nok N Possui Furo guia (Somente inserção PTH automática)

Ok Nok N Possui Fiducial (Somente montagem SMT)

Ok Nok N Possui Furação (Somente montagem PTH)

Ok Nok Deflexão/Empenamento

Ok Nok N Possui Máscara de Solda

Ok Nok N Possui Silk-Screen

Ok Nok N Possui Solder out

Solder out está ultrapassando a área de aplicação

Ok Nok Padrão de ilha dos componentes

Ok Nok Espaçamento dos componentes

Ok Nok Orientação dos componentes

3 - Componentes

Ok Nok Tipo de embalagem adequada

Componente fornecido em stick (vareta), ideal é vir enfitado

Ok Nok Compatibilidade com o processo (equipamento, térmico, químico)

4 - Processo

Ok Nok N Possui Stencil adequado

Ok Nok N Possui Inserção automática SMT otimizada (coordenadas fornecidas)

Ok Nok N Possui Inserção automática PTH otimizada (comp. enfitados, layout apropriado)

Pronto

Figura 37 - Formulário *DFM checklist* preenchido de acordo com a configuração da placa utilizada no estudo de caso

Neste estudo de caso a placa de circuito impresso estava praticamente compatível com o processo de montagem, pois o cliente utiliza as regras de DFM no projeto de seus produtos. Os itens que não estavam de acordo foram:

- *Solder out* (material inserido nos furos da placa para impedir que estes sejam preenchidos, durante a soldagem na máquina de solda por onda) – O *solder out* estava aplicado em excesso, transbordando para a superfície da placa, o que não estava permitindo uma correta aplicação da pasta de solda.
- Embalagem dos componentes – Um tipo de componente foi fornecido em *sticks* (tubos contendo um certo número de componentes). O ideal é que os componentes sejam fornecidos em fitas, pois além de aumentar o rendimento da linha, nas fitas os componentes são menos propícios a gerar falhas de alimentação.

5.3.2 Lista de componentes e layout da placa

Para registrar as características da placa devem ser preenchidos os documentos de lista de componentes e *layout* da placa. Estes documentos são utilizados para orientar o operador durante a montagem, inspeção ou retrabalho da placa, além disso, podem ser usado junto com outros documentos para um posterior estudo das configurações do produto que influenciam nas características do processo, como por exemplo: componentes que mais geram defeitos, rendimento de inserção dos componentes, parâmetros da máquina de solda em relação a densidade de componentes.

A lista de componentes (Figura 38) é uma planilha contendo as características dos componentes, a quantidade de cada componente na placa e o local de montagem dos componentes. O software utiliza a lista de componentes para calcular o índice DPMO da linha e o índice de complexidade da placa.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Menu							
2	Cliente: Empresa A				PCI: JKFB0			
4	Código do Componente	Tipo	Quant.	Num. Term.	Descrição	Local de Montagem		
5	1013958	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 33K 1/10W 5%	R(41)		
6	1013966	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 18K 1/10W 5%	R(10)		
7	1013982	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 5K-6 1/10W 5%	R(9)		
8	1013990	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 220K 1/10W 5%	R(43)		
9	1013904	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 100K 1/10W 5%	R(49)		
10	1013965	SMT	2	2	RESISTOR SMD 0603 68R 1/10W 5%	R(25,51)		
11	1014005	SMT	3	2	RESISTOR SMD 0603 3K3 1/10W 5%	R(3,26,48)		
12	1014064	SMT	3	2	RESISTOR SMD 0603 22K 1/10W 5%	R(31,40,42)		
13	1014072	SMT	10	2	RESISTOR SMD 0603 10K 1/10W 5%	R(5,11,19-22,28,33,47-48)		
14	1014102	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 2K2 1/10W 5%	R(27)		
15	1014110	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 1K5 1/10W 5%	R(45)		
16	1014129	SMT	2	2	RESISTOR SMD 0603 1K 1/10W 5%	R(17,35)		
17	1014146	SMT	2	2	RESISTOR SMD 0603 220R 1/10W 5%	R(15,34)		
18	1014153	SMT	3	2	RESISTOR SMD 0603 100R 1/10W 5%	R(12,32,44)		
19	1014161	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 22R 1/16W 5%	R(2)		
20	1014269	SMT	3	2	RESISTOR SMD 0603 0R 1A	R(8,55,57)		
21	1014366	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 560R 1/10W 5%	R(37)		
22	1014404	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 15K 1/10W 5%	R(16)		
23	1014412	SMT	2	2	RESISTOR SMD 0603 96R 1/10W +/-5%	R(24,50)		
24	1014696	SMT	3	2	RESISTOR SMD 0603 47R 1/10W 5%	R(6,14,18)		
25	1014609	SMT	3	2	RESISTOR SMD 0603 120R 1/10W 5%	R(1,29,30)		
26	1014633	SMT	2	2	RESISTOR SMD 0603 270R 1/10W 5%	R(36,39)		
27	1014641	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 330R 1/10W 5%	R(38)		
28	1014676	SMT	1	2	RESISTOR SMD 0603 8K2 1/10W 5%	R(4)		
29	1023996	SMT	1	16	C INTEGRADO SMD S1T8825	C(1)		
30	1023900	SMT	1	16	C INTEGRADO SMD S1T3361D	C(2)		
31	1060422	SMT	1	3	TRANSISTOR SMD BC848C SELECAO 1049	Q(4)		

Figura 38 - Lista de componentes da placa usada no estudo de caso

O *layout* da placa é um arquivo de imagem inserido no software para indicar as configurações de *layout* (formato das trilhas e ilhas que são impressas na placa) e o *silk-screen* da placa (símbolos e textos indicando a posição dos componentes na placa). O *layout* da placa pode ser usado junto com o *DFM checklist* para indicar os

pontos da placa que necessitam de alteração. A Figura 39 ilustra como são cadastrados no software o *layout* e *silk-screen* da placa de circuito impresso.

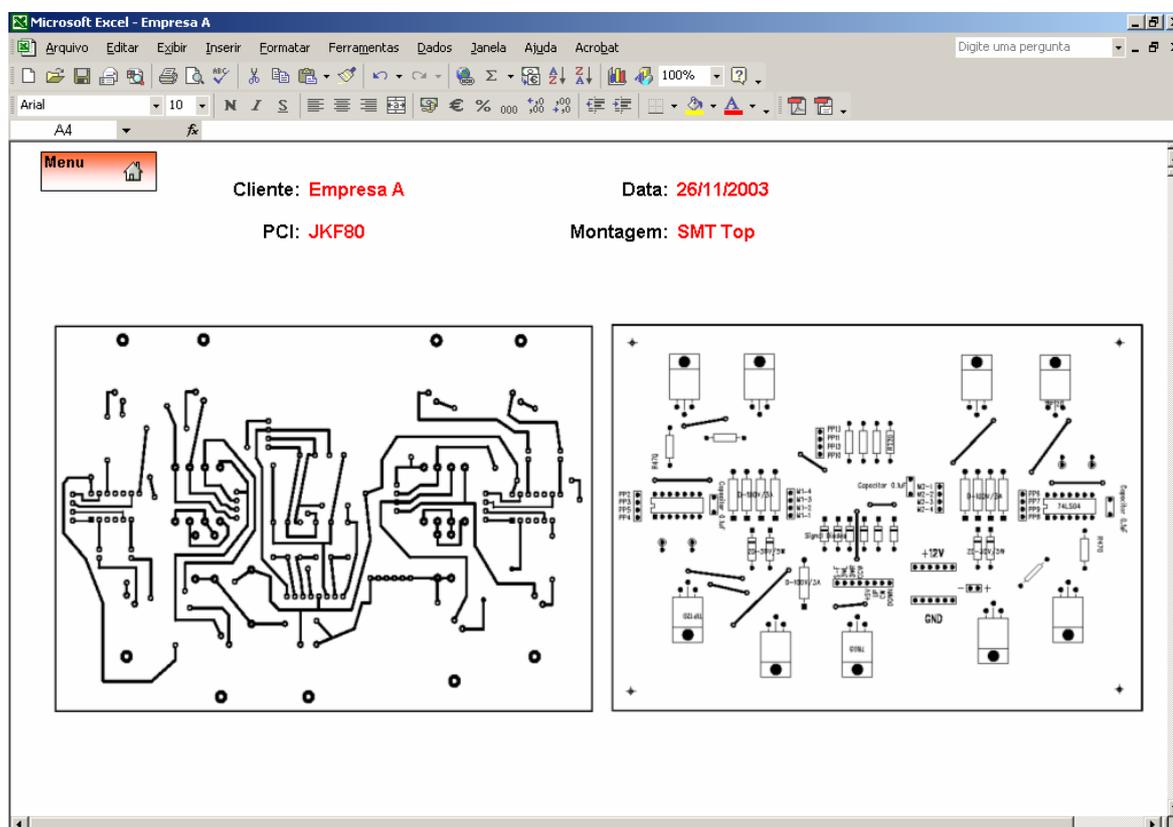


Figura 39 - *Layout* e *silk-screen* de uma placa de circuito impresso

A lista de componentes e o layout da placa são documentos fornecidos pelo cliente e transferidos para o formato do software. Para este estudo de caso o cliente enviou a lista de componentes no padrão Excel, o que facilitou o preenchimento dos dados.

5.3.3 Índice de complexidade

O software calcula automaticamente o índice de complexidade da placa. Para isto, as variáveis: número de juntas e o número de componentes, são carregadas de acordo com preenchimento da lista de componentes. As demais variáveis utilizadas para o cálculo (número de placas por painel, face da placa, tamanho do lote e dimensões da placa) devem ser inseridas pelo usuário. O índice de complexidade é calculado à medida que os dados vão sendo digitados.

O valor do índice de complexidade da placa utilizada no estudo de caso foi de aproximadamente 14, resultando numa placa de baixa complexidade. Os valores e a fórmula utilizada para o cálculo são mostrados na Figura 40.

Microsoft Excel - Empresa A

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

Arrial 11 5 95%

Menu

Cliente: **Empresa A** Data: **26/11/2003**

PCI: **JKF80** Montagem: **SMT Top**

$$I = \left[\frac{\#P(\#J + \#C)}{100} \right] * D * M * S$$

#P - Número de placas por painel
 #J - Número de Juntas
 #C - Número de Componentes
 S = Face Simples = 0,5 , Face Dupla = 1
 M = Baixa Mistura = 0,5 , Alta Mistura = 1
 D = Densidade da Junta = Juntas por cm²/15,5

Baixa Complexidade	Media Complexidade	Alta Complexidade
< 50	>= 50 e < 125	>= 125

Número de placas por painel:

Número de Juntas:

Número de Componentes:

Face da placa:

Mistura:

Comprimento da placa: cm

Largura da placa: cm

Índice de Complexidade:

Complexidade da placa:

Figura 40 - Cálculo do índice de complexidade da placa

5.3.4 Fluxograma e plano de controle

O fluxograma e o plano de controle são documentos fundamentais para a implantação da Fase 1, pois irão orientar e sistematizar as operações de processo. Nestes documentos devem estar indicados: o fluxo de montagem da placa, os pontos do processo que precisam ser controlados, o que precisa ser controlado (características de controle), como será feito o controle (técnica de avaliação, frequência e método de controle) e qual será a reação do operador quando ocorrer um fora de controle. Desta forma, com a utilização destes documentos pretende-se evidenciar todas as etapas de montagem e prever que todos os pontos críticos do processo sejam controlados de forma correta e padronizada.

O software dispõe de fluxogramas padrões para cada tipo de montagem de placa (SMT Top, SMT Top e Bottom, etc), sendo que estes são apresentados de acordo com o tipo de montagem selecionado no menu principal. Os fluxogramas indicam o fluxo de montagem da placa e todos os pontos possíveis no processo que podem necessitar de controle, estes pontos estão relacionados ao:

- Controle de material;
- Controle do produto em processo;
- Controle das variáveis de processo;
- Controle do produto pós-processo.

A Figura 41 ilustra o fluxograma utilizado no estudo de caso (SMT Top). Note-se que os pontos de controle (PC 01, PC 02, etc) referem-se à execução de uma determinada etapa, após a etapa ser executada e aos materiais (insumos) que são utilizados para a execução de uma etapa.

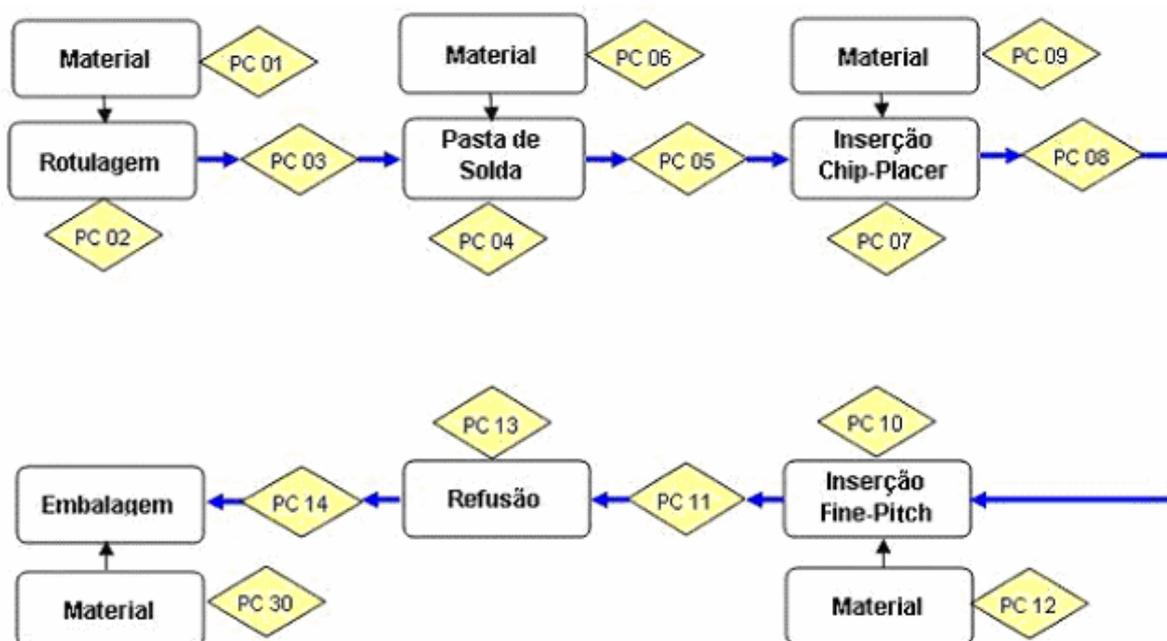


Figura 41 - Fluxograma para a montagem de uma placa do tipo SMT Top

Para elaboração do plano de controle foi implantada no software uma base de dados contendo as informações específicas para cada ponto de controle. Estas informações contêm os característicos de controle e a forma de controle para cada ponto do processo, podendo ser rapidamente inserida ou adaptada para o plano de controle da placa em questão. A Figura 42 ilustra a janela do software que cria o

plano de controle da placa. Note que o quadro mais acima da janela referencia os pontos de controle identificados nos fluxogramas, o quadro do meio contém as informações referentes aos pontos de controle e no último quadro estão as informações selecionadas para criar o plano de controle da placa.

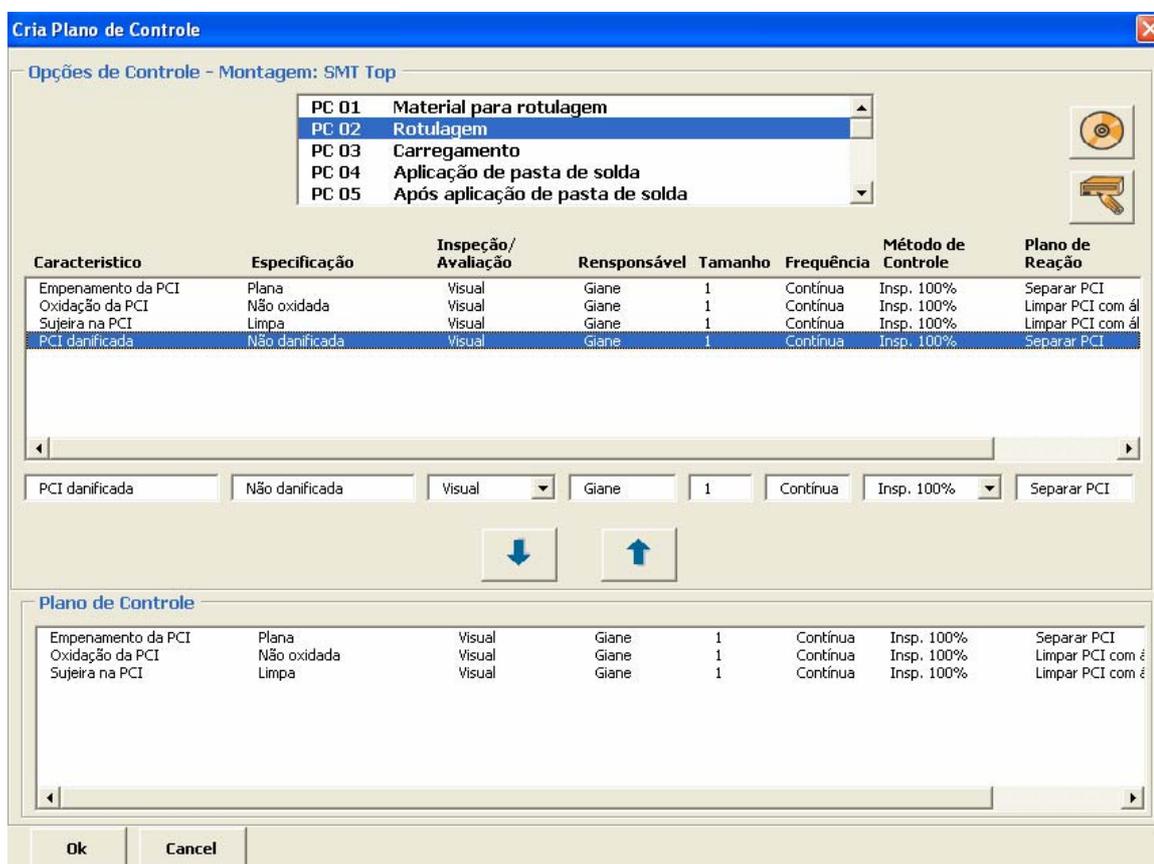


Figura 42 - Janela do software para criação do plano de controle da placa

A seguir será apresentado o plano de controle criado para a montagem da placa utilizada no estudo de caso, sendo que o fluxograma de montagem com a indicação dos pontos de controle já foram mostrados na Figura 41.

Tabela 7 - Plano de controle para montagem da placa SMT Top

Ponto de Controle	Nome do Processo/ Descrição Operação	Característico	Especificação	Técnica Inspeção	Resp.	Amostra	Frequência	Método de Controle	Plano de Reação
PC 01	Material para rotulagem	Estado da etiqueta	Legível e colante	Visual	Giane	100%	Contínua	Insp. 100%	Imprimir nova etiqueta
PC 02	Rotulagem	Empenamento da PCI	Plano	Visual	Giane	100%	Contínua	Insp. 100%	Separar PCI
PC 02	Rotulagem	Oxidação da PCI	Não oxidada	Visual	Giane	100%	Contínua	Insp. 100%	Limpar PCI com álcool isopropílico
PC 02	Rotulagem	Sujeira na PCI	Limpa	Visual	Giane	100%	Contínua	Insp. 100%	Limpar PCI com álcool isopropílico
PC 02	Rotulagem	PCI danificada	Não danificada	Visual	Giane	100 %	Contínua	Insp. 100%	Separar PCI
PC 03	Carregamento da PCI	Posicionamento	Direção da montagem	Visual	Giane	100%	Contínua	Insp. 100%	Corrigir posicionamento
PC 04	Aplicação de pasta de solda	Velocidade de impressão (Printed Speed)	Boa rolagem da pasta de solda	Visual	Paulo	1 placa	Cada 20 placas montadas	Insp. 100%	Corrigir velocidade de impressão
PC 04	Aplicação de pasta de solda	Pressão do rodo (Squeegee Pressure)	Boa rolagem da pasta de solda	Visual	Paulo	1 placa	Cada 20 placas montadas	Insp. 100%	Corrigir pressão do rodo
PC 04	Aplicação de pasta de solda	Distância entre estêncil e placa (gap)	Volume de depósito correto	Visual	Paulo	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Corrigir distância do estêncil
PC 04	Aplicação de pasta de solda	Estêncil	Limpo	Visual	Paulo	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Limpar estêncil
PC 05	Após aplicação de pasta de solda	Volume da pasta de solda	De acordo com os padrões impressão	Visual	Paulo	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Procedimento configuração aplicação de pasta de solda
PC 05	Após aplicação de pasta de solda	Alinhamento da pasta de solda	De acordo com os padrões impressão	Visual	Paulo	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Procedimento configuração aplicação de pasta de solda
PC 05	Após aplicação de pasta de solda	Aplicação correta de pasta de solda	Aplicação sobre todos os pads da placa	Visual	Paulo	100%	Contínua	Insp. 100%	Verificar limpeza do estêncil e volume de pasta de solda
PC 06	Material aplicação de pasta de solda	Viscosidade da pasta de solda	Boa rolagem da pasta de solda	Visual	Paulo	100%	Setup e realimentação	Aprovação da 1ª placa	Substituir pasta de solda
PC 06	Material aplicação de pasta de solda	Empenamento do estêncil	Plano	Visual	Paulo	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Substituir estêncil
PC 06	Material aplicação de pasta de solda	Estêncil danificado	Não danificado	Visual	Paulo	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Substituir estêncil
PC 07	Inserção componente (Chip-Placer)	Pressão de Inserção (Placement pressure)	Componente inserido corretamente	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Corrigir pressão de inserção
PC 07	Inserção componente (Chip-Placer)	Velocidade de inserção (Placement speed)	Componente inserido corretamente	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Corrigir velocidade de inserção
PC 07	Inserção componente (Chip-Placer)	Tipo de Nozzle	Componente inserido corretamente	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Adequar Nozzle
PC 08	Após inserção comp. (Chip-Placer)	Componente desalinhado	De acordo com os padrões inserção	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Ver proced. (inserção, DFM aceitação e pasta de solda)
PC 08	Após inserção comp. (Chip-Placer)	Componente faltando	Ausência	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Ver procedimentos (inserção, DFM e pasta de solda)

Tabela 8 - Plano de controle para montagem da placa SMT Top (continuação)

Ponto de Controle	Nome do Processo/ Descrição Operação	Característico	Especificação	Técnica Inspeção	Resp.	Amostra	Frequência	Método de Controle	Plano de Reação
PC 08	Após inserção comp. (Chip-Placer)	Componente invertido	Ausência	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Corrigir programa
PC 09	Material inserção comp. (Chip-Placer)	Código do componente	Código correto	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup e realimentação	Aprovação da 1ª placa	Verificar lista de componentes
PC 09	Material inserção comp. (Chip-Placer)	Disposição do componente	Disposição correta	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup e realimentação	Aprovação da 1ª placa	Corrigir disposição dos componentes
PC 10	Inserção componente (Fine-pitch)	Pressão de Inserção (Placement pressure)	Componente inserido corretamente	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Corrigir pressão de inserção
PC 10	Inserção componente (Fine-pitch)	Velocidade de inserção (Placement speed)	Componente inserido corretamente	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Corrigir velocidade de inserção
PC 10	Inserção componente (Fine-pitch)	Tipo de Nozzle	Componente inserido corretamente	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Adequar Nozzle
PC 11	Após inserção comp. (Fine-pitch)	Componente desalinhado	De acordo com os padrões inserção	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Ver procedimentos (inserção aceitação e pasta de solda)
PC 11	Após inserção comp. (Fine-pitch)	Componente faltando	Ausência	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Ver procedimentos (inserção e pasta de solda)
PC 11	Após inserção comp. (Fine-pitch)	Componente invertido	Ausência	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Corrigir programa
PC 12	Material inserção comp. (Fine-pitch)	Código do componente	Código correto	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup e realimentação	Aprovação da 1ª placa	Verificar lista de componentes
PC 12	Material inserção comp. (Fine-pitch)	Disposição do componente	Disposição correta	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup e realimentação	Aprovação da 1ª placa	Corrigir disposição dos componentes
PC 13	Soldagem por refusão	Perfil de temperatura	Perfil correto	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Corrigir programa
PC 13	Soldagem por refusão	Velocidade da esteira	Velocidade correta	Visual	Elton e Roberto	100%	Setup	Aprovação da 1ª placa	Corrigir programa
PC 14	Após soldagem por refusão	Curto	Ausência	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Ver procedimentos (inserção, DFM e pasta de solda)
PC 14	Após soldagem por refusão	Ausência ou insuficiência de solda	De acordo com os padrões de soldagem	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Ver proced. (inserção, DFM, aceitação e pasta de solda)
PC 14	Após soldagem por refusão	Tombstone (componente suspenso)	Ausência	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Ver procedimentos (inserção, DFM e pasta de solda)
PC 14	Após soldagem por refusão	Componente desalinhado	De acordo com os padrões inserção	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Ver proced. (inserção, DFM, aceitação e pasta de solda)
PC 14	Após soldagem por refusão	Componente danificado	Ausência	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Ver procedimentos inserção e perfil de temperatura
PC 14	Após soldagem por refusão	Empenamento da PCI	Plano	Visual	Elton e Roberto	100%	Contínua	Folha de verificação	Verificar perfil de temperatura

5.3.5 Rastreabilidade

O software possui uma planilha onde são criadas automaticamente etiquetas para identificar as placas. A identificação é necessária para que as informações coletadas durante a produção possam ser associadas às placas que estão sendo montadas no momento, permitindo uma correta análise dos dados.

Para este estudo de caso as etiquetas foram criadas contendo o código da placa e um número seqüencial. Estas etiquetas foram inseridas antes da placas entrarem no processo de montagem, sendo que as placas eram carregadas na linha de acordo com o número da etiqueta. A Figura 43 ilustra a janela do software para a criação de etiquetas e no fundo as etiquetas inseridas na planilha.

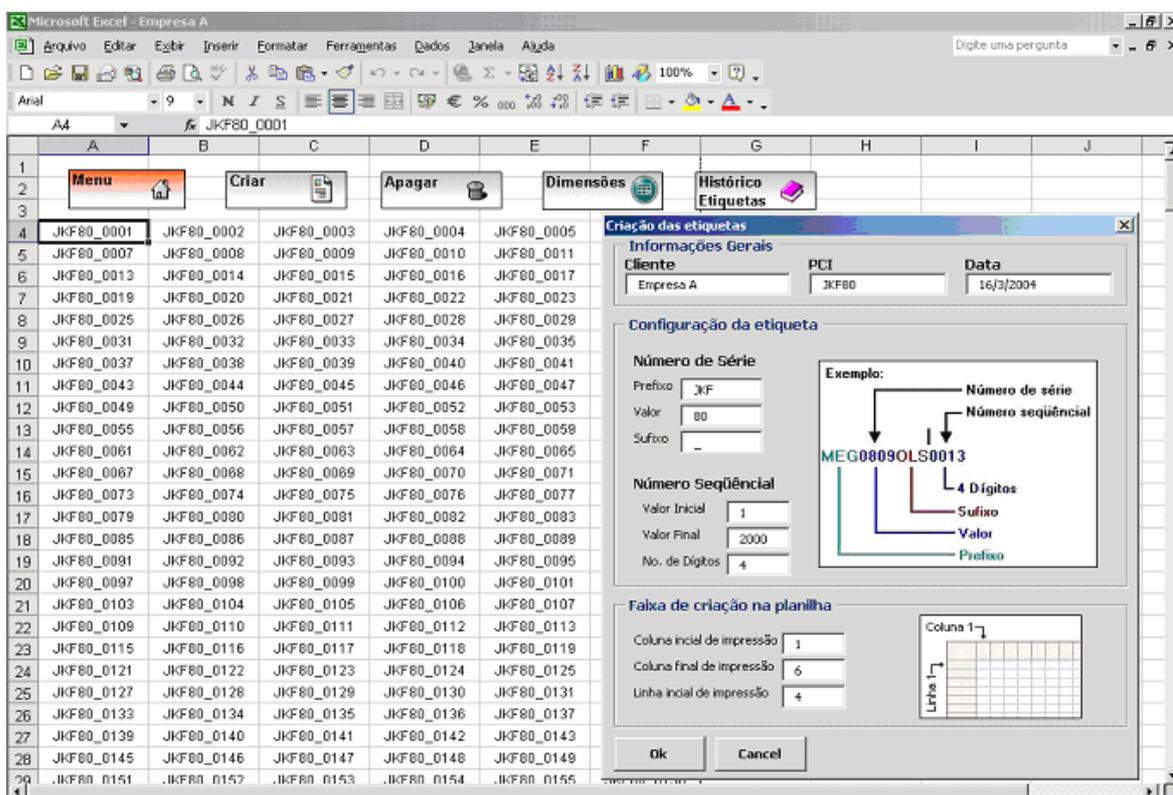


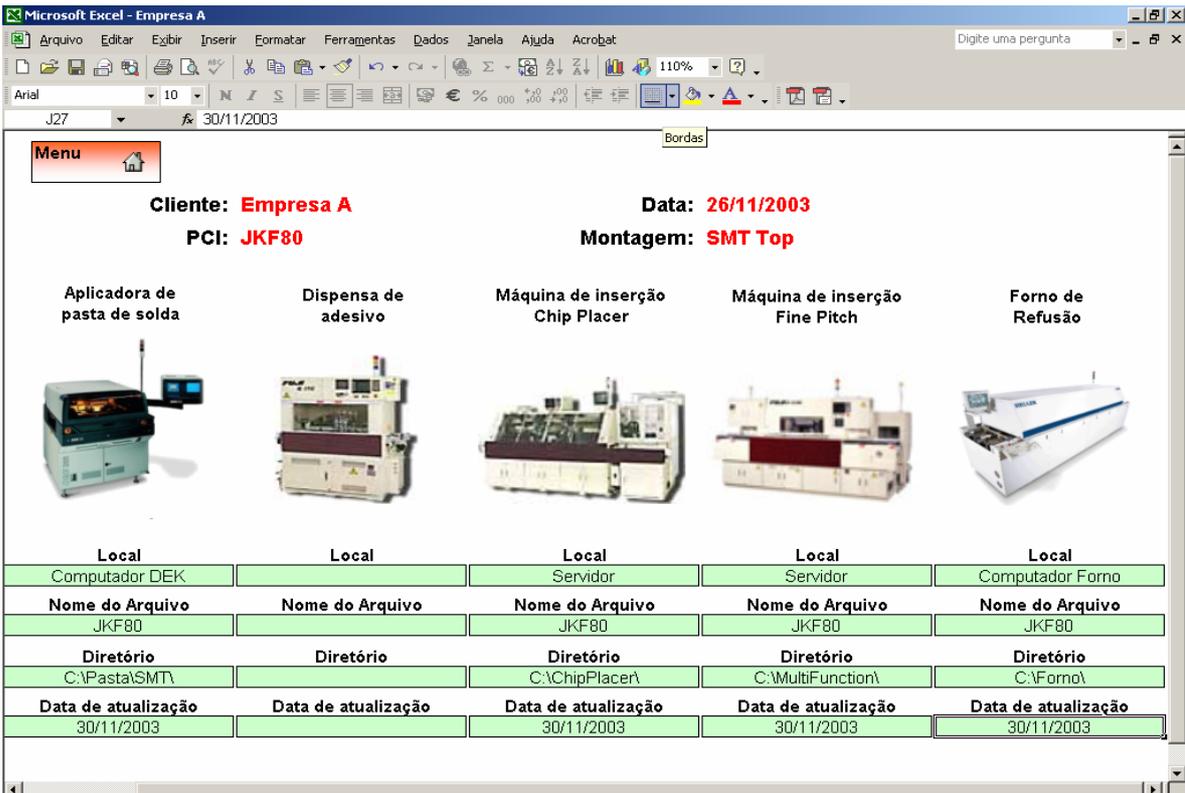
Figura 43 - Criação de etiquetas para identificação das placas

5.3.6 Parâmetros de processo

Todos os parâmetros de processo e configurações das máquinas devem estar incluídos na base de dados da qualidade, para posteriormente serem

usados na análise do processo e estudo de melhorias. Contudo, estes parâmetros e configurações são programados na própria máquina através de aplicativos dedicados, impossibilitando a visualização dentro do software.

Para facilitar a consulta ou alteração destes arquivos foi criada no software uma ficha cadastral, onde são indicados o nome do arquivo e o local onde se encontra. A Figura 44 ilustra o formato da planilha para cadastro dos arquivos de configuração e parametrização das máquinas.



Menu				
Cliente: Empresa A		Data: 26/11/2003		
PCI: JKF80		Montagem: SMT Top		
Aplicadora de pasta de solda	Dispensa de adesivo	Máquina de inserção Chip Placer	Máquina de inserção Fine Pitch	Forno de Refusão
				
Local	Local	Local	Local	Local
Computador DEK		Servidor	Servidor	Computador Forno
Nome do Arquivo	Nome do Arquivo	Nome do Arquivo	Nome do Arquivo	Nome do Arquivo
JKF80		JKF80	JKF80	JKF80
Diretório	Diretório	Diretório	Diretório	Diretório
C:\Pasta\SMT\		C:\ChipPlacer\	C:\MultiFunction\	C:\Forno\
Data de atualização	Data de atualização	Data de atualização	Data de atualização	Data de atualização
30/11/2003		30/11/2003	30/11/2003	30/11/2003

Figura 44 - Cadastro dos arquivos de configuração e parametrização da linha SMT

5.3.7 Diário de bordo

O diário de bordo é usado para criar um histórico das modificações ocorridas no processo durante a montagem da placa, como também para desenvolver uma base de dados de problemas e soluções. Toda a informação anotada no diário de bordo deve ter indicada a data e a hora da ocorrência, o operador que anotou a informação e o código da etiqueta da placa que estava sendo montada no momento. Este procedimento é necessário para

posteriormente poder confrontar as informações contidas no diário de bordo com os outros dados coletados durante o processo de montagem, podendo relacionar estas informações no tempo. A Figura 45 ilustra uma parte informações anotadas no diário de bordo durante a montagem da placa usada no estudo de caso.

Placa	Detalhe	Data	Hora	Operad.
59	Início da Produção	14/11/2003	13:00	Elton
118	Fim da Produção	14/11/2003	23:00	Elton
119	Início da Produção	15/11/2003	07:30	Elton
136	Aumento da velocidade de montagem	15/11/2003	13:00	Elton
205	Fim da Produção	15/11/2003	20:40	Elton
206	Início da Produção	16/11/2003	09:20	Beto
262	Fim da Produção	16/11/2003	18:30	Beto
263	Início da Produção	17/11/2003	08:00	Elton
369	Fim da Produção	17/11/2003	22:30	Elton
370	Início da Produção	18/11/2003	07:40	Elton
414	Limpeza de componentes que caíram da PCI	18/11/2003	14:50	Elton
416	Ajuste nos pinos que sustentam a placa	18/11/2003	15:10	Elton
435	Troca de pasta - nova	18/11/2003	16:50	Marco
453	Corrigido coord. CAP. 0805 Alim 44	18/11/2003	19:50	Marco
477	Fim da Produção	19/11/2003	22:00	Elton
478	Início da Produção	19/11/2003	07:50	Elton
589	Fim da Produção	19/11/2003	22:00	Elton
590	Início da Produção	20/11/2003	07:45	Elton
601	Correcção do valor comp. R15 placa 2	20/11/2003	09:30	Marco

Figura 45 - Diário de bordo relatando as modificações ocorridas no processo

5.3.8 Histórico do processo

O histórico do processo é uma planilha onde são registrados os defeitos encontrados na inspeção e testes das placas. O cadastro dos defeitos é feito por lote de placas ou pelo total de placas verificadas no dia. O histórico de processo é uma ferramenta para a empresa conhecer e analisar o desempenho do processo, pois contém o registro dos defeitos que ocorreram durante todo processo de montagem de um determinado tipo de placa.

O software utiliza o histórico de processo em conjunto com a lista de componentes para determinar o índice DPMO da linha. O índice DPMO é

calculado automaticamente utilizando a metodologia da norma IPC-7912 [87], permitindo uma rápida determinação do nível de qualidade da montagem.

A Figura 46 apresenta a planilha de histórico de processo com a quantidade e os tipos de defeitos encontrados pela inspeção visual manual e os valores dos índices DPMO correspondentes, durante a montagem da placa usada como estudo de caso.

Data	Total de placas ou painéis inspecionados	Defeitos de Componente							Defeitos de Inserção					Defeitos de Terminação					DPMO Componentes	DPMO Inserção	DPMO Terminações	DPMO							
		Componente fisicamente danificado	Componente com dimensões erradas	Componente eletricamente defeituoso	Identificação do componente ilegível	Terminal do componente defeituoso	Componente sujo, oxidado, etc.	PCI empenada	PCI danificada	PCI suja, oxidada, etc.	Componente extra	Componente faltando	Componente invertido	Componente incorreto (posição)	Comp. inserido incorretamente (altura)	Tombstone	Terminal incorreto (comp., ângulo)	Componente desalinhado					Curto	Ausência ou insuficiência de solda	Excesso de solda	Soldagem deficiente (junta fria,)	Estalactite	Solder Balls (Beading)	Bluraco na solda
		Valor médio acumulado																											
																										0	189	63	78
13/11/2003	10								2							3										0	205	0	48
14/11/2003	28								1					2	18	6										0	307	39	92
15/11/2003	123								22					8	4	1	2									0	113	4	29
16/11/2003	36								12				3	2	5											0	250	0	59
17/11/2003	109								68					2	17											0	327	0	76
18/11/2003	103								23			1	1	7		127		5							0	127	230	152	
19/11/2003	100								16			1	15	7	4	11		53							0	160	122	102	
20/11/2003	97								11			1	23	4	1	2	1								0	165	7	42	
21/11/2003	76								34			3	26	2		3									0	351	7	86	
22/11/2003	11								1										5							0	37	82	52
23/11/2003	21													2		8	13		2							0	39	197	114

Figura 46 - Planilha de histórico do processo para registro dos defeitos encontrados na linha

Para facilitar a visualização e análise dos dados é criado automaticamente pelo software um gráfico de Pareto dos tipos de defeitos registrados. Este diagrama pode ser utilizado para direcionar os pontos onde as melhorias são essenciais. A Figura 47 ilustra o gráfico de Pareto dos defeitos encontrados na inspeção em 97 das placas que foram analisadas no estudo de caso.

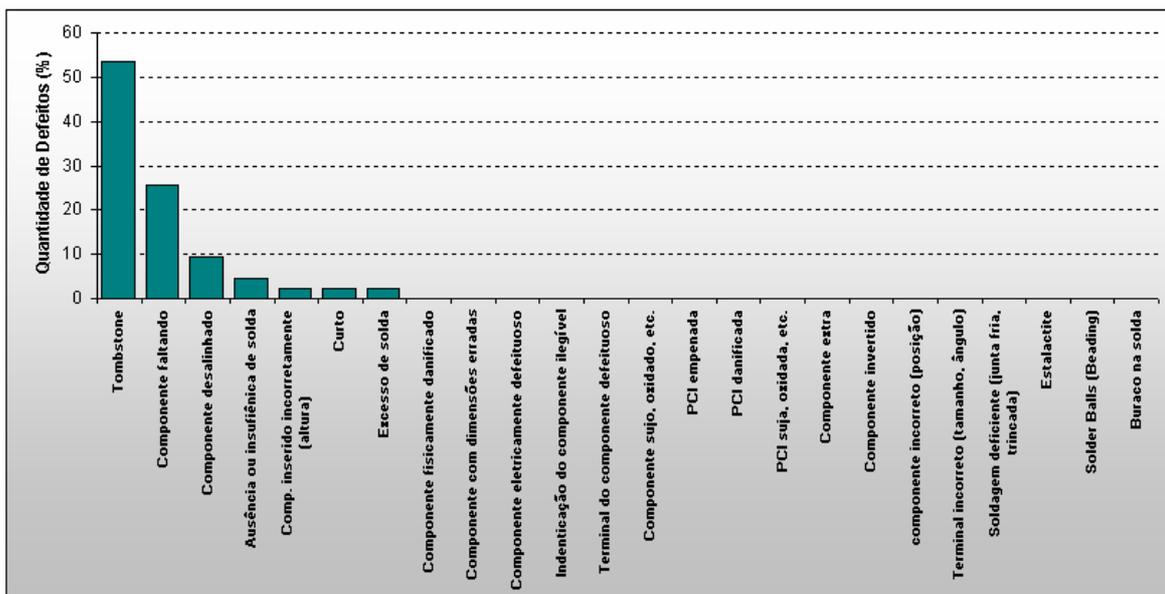


Figura 47 - Diagrama de Pareto dos tipos de defeitos encontrados na inspeção

Os resultados mostram que embora os defeitos estejam relacionados à inserção e à terminação, a causa principal destes defeitos está vinculada à aplicação da pasta de solda. Portanto, caso houvesse uma perfeita aplicação de pasta de solda este índice de defeitos reduziria drasticamente. Um ponto a ser ressaltado é em relação aos defeitos relacionados a componentes. Utilizando apenas a inspeção visual é impossível detectar a existência de componentes eletricamente defeituosos. Com isso, não é possível avaliar a qualidade dos fornecedores de componentes e a compatibilidade dos componentes com o processo de montagem.

5.3.9 Controle de defeitos no cliente

O controle de defeitos no cliente é um formulário enviado junto com as placas montadas. Neste formulário o cliente preenche a quantidade e os tipos de defeitos que foram encontrados nos testes finais, manutenção em campo, reclamações de cliente, retornando esta informação para empresa. A Figura 48 ilustra o formato do formulário que é enviado ao cliente.

Controle de defeitos no cliente			
Prezado Cliente,			
Com o objetivo de aprimorar nossos serviços de montagem de placas de circuito impresso, a Megaflex Sul está encaminhando um formulário de controle de defeitos no cliente. Aqui constam os principais tipos de defeitos que podem ocorrer durante o processo de montagem. Sua avaliação é muito importante para o nosso sistema da qualidade, por gentileza, preencha os campos e encaminhe para a nossa empresa, através do fax (0xx48) 248-7977.			
1. Descrição da Montagem			
Cliente: <u>Empresa A</u>	Data: <input style="width: 100px;" type="text"/>		
PCI: <u>JKF80</u>	Resp.: _____		
Tipo de montagem:			
<input type="checkbox"/> PTH Top	<input type="checkbox"/> SMT Top e Bottom	<input type="checkbox"/> PTH Top / SMT Bottom	
<input checked="" type="checkbox"/> SMT Top	<input type="checkbox"/> PTH Top / SMT Top	<input type="checkbox"/> PTH Top / SMT Top e Bottom	
Total de PCI's montadas:	<input style="width: 50px;" type="text"/>		
2. Defeitos de Montagem			
Total de PCI's avaliadas:	<input style="width: 50px;" type="text"/>		
Total de PCI's com defeitos:	<input style="width: 50px;" type="text"/>		
Quantifique o total de defeitos para cada item mencionado:			
Componentes		Montagem	
PCI danificada	<input style="width: 30px;" type="text"/>	Componente inserido incorretamente (invertido, trocado, desalinhado ou faltando)	<input style="width: 30px;" type="text"/>
Componente danificado	<input style="width: 30px;" type="text"/>	Curto	<input style="width: 30px;" type="text"/>
Componente eletricamente defeituoso	<input style="width: 30px;" type="text"/>	Ausência ou insuficiência de solda	<input style="width: 30px;" type="text"/>
Outros _____	<input style="width: 30px;" type="text"/>	Outros _____	<input style="width: 30px;" type="text"/>
Observações: _____			

3. Avaliador			
Nome: _____			
Depto.: _____		Telefone: _____	

Figura 48 - Formulário de controle de defeitos

A função deste formulário é conhecer o nível da qualidade atingida. Ele é muito importante para verificar a eficácia da montagem, dado o escasso poder de detecção da inspeção visual manual. Para este estudo de caso um formulário foi enviado a cada lote de 500 placas montadas (total 4 formulários para o pedido todo), porém, somente um formulário foi retornado pelo cliente. Isso levou à conclusão que para este sistema funcionar corretamente é preciso que antes exista um trabalho de conscientização dos clientes, com relação à importância deste formulário.

5.3.10 Histórico do cliente

O histórico do cliente é uma planilha para cadastro dos defeitos encontrados nos testes feitos pelo cliente. Esta planilha deve ser preenchida assim que o formulário de controle de defeitos no cliente retornar para empresa. O histórico do cliente irá mostrar o rendimento da empresa em relação à entrega de produtos sem defeitos, permitindo refletir sobre a qualidade do serviço.

Para este estudo de caso o cliente retornou o resultado dos testes realizados em 500 placas, contendo um total de 81 defeitos. A Figura 49 ilustra a planilha de histórico de defeitos no cliente preenchida com os dados do cliente.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled 'Empresa A'. The spreadsheet contains a table with the following data for the date 17/12/2003:

Data	Total de PCI's montadas	Total de PCI's avaliadas	Total de PCI's com defeitos	Defeitos de Componentes				Defeitos de Montagem				Total de Defeitos de Componentes	Total de Defeitos Montagem	Total de Defeitos	Rendimento (%)
				PCI danificada	Componente danificado	Componente eletricamente defeituoso	Outros (Componentes)	Componente inserido incorretamente	Curto	Ausência ou insuficiência de solda	Outros (Montagem)				
17/12/2003	500				16			60	4	1		16	65	81	

Figura 49 - Planilha para cadastrar os defeitos encontrados nos testes de placas executados pelo cliente

Cabe ressaltar que os defeitos encontrados nos testes funcionais feitos pelo cliente mostram a limitação da empresa em detectar defeitos quando somente é realizada uma inspeção visual manual nas placas, sendo que esta situação torna-se mais grave com o aumento da complexidade da placa.

5.3.11 Resultados obtidos

A utilização do software para este estudo de caso facilitou a implantação dos métodos propostos pela Fase 1 da sistemática, permitindo alcançar os principais objetivos esperados nesta fase. Os resultados obtidos com a aplicação do software foram:

- sistematizou as operações dentro da empresa;
- deu-se início à criação de uma base de dados da qualidade, através do registro e organização das informações;
- introduziu-se o conceito do DFM para todos os funcionários;
- obteve-se um alto rendimento na elaboração do plano de controle;
- incentivou-se os funcionários a utilizarem os métodos de garantia da qualidade;
- com o cálculo automático do DPMO, o índice para medir a qualidade do processo foi padronizado;
- facilitou-se a análise dos dados de inspeção.

No entanto, para uma total validação do software é necessário utilizá-lo na montagem de placas de outros clientes com distintos tipos de produtos e unidades de produção variadas.

O software apresentado é uma ferramenta que pode ser aperfeiçoada à medida que a empresa vai avançando no seu sistema de garantia da qualidade. Novas facilidades e funções podem ser incorporadas, como por exemplo: gráficos de controle, base de dados de componentes, leitura e escrita automática da lista de componentes para as máquinas de inserção, compartilhamento de informações via Internet. Desta forma, o software e a sistemática proposta podem formar uma solução integrada para uma empresa montadora de placas de circuito impresso conseguir melhorar progressivamente a qualidade e a produtividade dos seus serviços.

6 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES FUTURAS

Na presente dissertação foram discutidos assuntos julgados relevantes para a implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso. A seguir serão apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho e as recomendações para estudos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma sistemática para a implantação da garantia da qualidade para empresas montadoras de placas de circuito impresso, composta em três fases, cada uma das quais acrescenta novas técnicas para melhoria da qualidade e novos e mais efetivos meios de inspeção, transformando progressivamente a cultura e capacidade da empresa para atingir patamares mais altos de qualidade e eficiência. O conteúdo desta dissertação de mestrado poderá servir de aporte para qualquer empresa brasileira montadora de placas de circuito impresso, já que sua estruturação propõe métodos e diretrizes de implantação que visam englobar empresas com diferentes de níveis de qualidade e capacidade de processos.

Descreveu-se também uma aplicação prática, na qual foi iniciada a implantação da Fase 1 da sistemática no LABelectron/Megaflex Sul. Neste estudo de caso criou-se uma solução alternativa, através de um software dedicado, para implantar a sistemática dentro da empresa. A sistemática mostrou-se bastante apropriada para a realidade da empresa. Alguns resultados foram imediatamente atingidos como: identificação dos pontos críticos do proceso,

determinação do nível de qualidade da empresa, sistematização de algumas operações, criação do histórico da qualidade da empresa, enquanto outros, como: retorno das informações de defeitos nos clientes, criação de documentos (plano de controle, procedimentos) ainda não foram alcançados, devido à falta de envolvimento global dos funcionários e clientes.

Assim, pode-se considerar como uma das maiores dificuldades encontradas para a implantação da Fase 1, o comprometimento de todos os funcionários e clientes na execução das atividades propostas pela sistemática. Porém, a partir do rompimento dessas barreiras, todos os resultados esperados deverão acontecer, validando a Fase 1 da sistemática

No decorrer deste trabalho enfatizou-se que a implantação da garantia da qualidade numa empresa montadora de placas de circuito impresso é extremamente trabalhoso, pois além de operar com processos complexos e produtos altamente dinâmicos, a qualidade no processo de montagem está diretamente ligada à qualidade dos componentes elétricos, placas nuas, insumos e *design* da placa. Desta forma, torna-se necessário que empresa montadora possua uma efetiva gestão preventiva e um processo controlado e capaz.

Durante a implantação da sistemática, percebeu-se que para uma empresa montadora que não desenvolve o projeto da placa, ou seja, apenas presta serviços de montagem, os desafios para a implantação da garantia da qualidade tornam-se ainda maiores, pois a empresa pode deparar com barreiras como: clientes que relutam em fazer novo projeto da placa, os componentes são fornecidos pelos próprios clientes, os testes das placas são executados fora da empresa montadora, os dados de defeitos em campo não são retornados pelos clientes, impedindo de implantar integralmente a garantia da qualidade na empresa.

Através da pesquisa bibliográfica e posteriormente com observações práticas, verificou-se que a maioria dos defeitos contidos numa placa de circuito impresso é causada pelo processo de montagem, sendo que numa linha de montagem TH, a máquina de solda por onda é processo que mais ocasiona defeitos na placa de circuito impresso, enquanto que na linha de montagem SMT, o processo mais crítico é a aplicação de pasta de solda.

Um outro ponto a ser considerado para implantar um sistema de garantia da qualidade é a complexidade das placas montadas pela empresa, dependendo de fatores como: o número de componentes contidos na placa, a geometria e a dimensão dos componentes, a função que a placa será destinada e demais fatores, poderá exigir um processo de montagem extremamente capaz e técnicas de inspeção e teste eficientes, pois de uma outra forma a taxa de produtos defeituosos gerados pelo processo de montagem será elevada. Assim, é necessário implantar um sistema que garanta a qualidade de quaisquer modelos de placas montados pela empresa.

Por fim, percebe-se que a implantação da garantia da qualidade está ligada ao compromisso pela busca de técnicas, linguagem e filosofias adequadas e dinâmicas. No decorrer deste trabalho mostrou-se que através da utilização de um software estes objetivos são mais fáceis de serem atingidos.

6.2 OPORTUNIDADES FUTURAS

Em função de peculiaridades e limitações próprias, este trabalho deixa em aberto várias questões que podem ser desenvolvidas em outros estudos. A principal delas está relacionada à comprovação da efetividade da sistemática em atingir os resultados esperados em cada fase. Além disso, sugere-se as seguintes recomendações para orientar futuros trabalhos:

- aplicar a sistemática em outras empresas montadoras de placas de circuito impresso que estejam em distintos estágios da qualidade;
- desenvolver um software que possa ser aplicado para todas as fases da sistemática;
- avaliar a importância dos custos da não-qualidade para empresas montadoras de placas de circuito impresso;
- estudar o efeito para empresários e trabalhadores, após a implantação de cada fase da sistemática na empresa;
- integrar a sistemática de garantia da qualidade com os ensaios para melhoria de confiabilidade;

- executar estudos de otimização dos parâmetros das máquinas e equipamentos de processos;
- automatizar a coleta dos dados de inspeção e processo;
- analisar a influência dos aspectos metrológicos na sistemática proposta;
- estudar outras técnicas de inspeção e testes utilizados no processo de montagem de placas de circuito impresso;
- desenvolver um sistema que verifique a compatibilidade do *design* da placa de circuito impresso com processo de montagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LINK, A. N. **Early Stage Impacts of the Printed Wiring Board Joint Venture**. Assessed at Project End. Disponível em: <<http://www.atp.nist.gov/eao/pwbrpt.htm>>. Acesso em: 15 ago. 2003.
- [2] MELO, P. R.; RIOS, E. D.; GUTIERREZ R. **Placas de Circuito Impresso: Mercado Atual e Perspectivas**. Complexo Eletrônico, BNDS. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/publicacoes/catalogo/setor2.asp>>. Acesso em: 13 out. 2003.
- [3] JURAN, J.M. **Qualidade no século XXI**. São Paulo: ed. Savana, 1997.
- [4] FUSE TTN. **Printed Circuit Board and Surface Mount Design**. Disponível em: <<http://www.fuse-network.com/fuse/training/index.html>>. Acesso em: 30 set. 2003.
- [5] BRINDLEY, K. N. **Electronics Assembly Handbook**. Oxford: Heinemann Professional Publishing Ltd, 1990.
- [6] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-DRM-18F**: Component Identification Desk Reference Manual, USA, 2001.
- [7] YOST, F.G.; HOSKING, F.M.; FREAR, D.R. **The Mechanics of Solder Alloy: Wetting & Spreading**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [8] WOODGATE, R. W. **The Handbook of Machine Soldering: SMT and TH**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [9] BENTZEN, B. S. **Reflow Soldering**. STM in Focus. Disponível em: <http://www.smtinfocus.com/processguide_reflow.html>. Acesso em: 15 jul. 2003.
- [10] BAUER, B.; LATHROP, R. **An Introduction to Solder Materials**. Disponível em: <http://www.4cmd.com/wch/cmd/e_CMD_Techinfo.nsf/WebViewByCate>

gories/2CE6919CD306812CC1256B7D006B44DE/\$FILE/INTROMAT.pdf>.

Acesso em: 13 ago. 2003.

- [11] KOH, J. **Solder Paste**. SMT in Focus. Disponível em: <http://www.smtinfocus.com/paper_solderpaste.html>. Acesso em: 20 mar. 2003.
- [12] TIMMS, J. L. **Step 6: Component Placement**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Articles&Subsection=Display&ARTICLE_ID=178381>. Acesso em: 25 out. 2003.
- [13] BENTZEN, B. S. **SMD Placement**. SMT In Focus. Disponível em: <http://www.smtinfocus.com/processguide_placement.html>. Acesso em: 23 nov. 2003.
- [14] BENTZEN, B. S. **Reflow Soldering**. SMT In Focus. Disponível em: <http://www.smtinfocus.com/processguide_reflow.html>. Acesso em: 23 nov. 2003.
- [15] SCHEINER, D. **Reflow Profile Optimization**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Articles&Subsection=Display&ARTICLE_ID=186600>. Acesso em: 14 out. 2003.
- [16] BLACKWELL, G. R. **The Electrical Engineering Handbook**. Boca Raton: Ed. Richard C. Dorf, 2000.
- [17] INSTITUTE BOLTON. **Concepts of Printed Circuit Design, Unit 1 – Introduction to PCB Technology**. Disponível em: <http://www.ami.ac.uk/modules/edr/ami4809_pcd/unit_01/>. Acesso em: 20 nov. 2003.
- [18] PERIPHERON, **Design for Manufacturability (DFM)**. Disponível em: <<http://www.peripheron.com/DFM%20PeriPheron.pdf>>. Acesso em: 04 ago. 2003.
- [19] ROWLAND, R. **DPMO and IPC-7912**. PennWell Corporation. Disponível em:

<http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=96166&KEYWORD=DPMO>. Acesso em: 10 nov. 2003.

- [20] SMT IN FOCUS. **SMT Failure Library**. Disponível em: <http://www.smtinfocus.com/smt_failure_list.html>. Acesso em: 15 set. 2003.
- [21] WILLIS, B. **Process Defect Guides**, PPM-Monotoring. Disponível em: <<http://www.thepdfshop.co.uk/ppm/asp/process.asp>>. Acesso em: 12 set. 2003.
- [22] AIM. **Types of wave solder defects**. Disponível em: <<http://www.aimsolder.com/troubleshoot/Wave%20TS.pdf>>. Acesso em: 03 jul. 2003.
- [23] LING, R. **Challenges of PCBA testing today**, Agilent Technologies. Disponível em: <http://www.ate.agilent.com/Emt_Asia/Events/Past_Events/Docs/Challenges_of_PCBA_Testing_Today.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2003.
- [24] ORESJO, S. **Defects levels for different component types at the PCBA manufacturing process**, Agilent Technologies, Loveland, Colorado, 1999.
- [25] TESTRONICS, **Differences in loaded board test & inspection philosophies**. Disponível em: <<http://www.testronics.com/DiffInLoadedBoardTest.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2003.
- [26] DA, H.E.; EKERE, N. N.; CURRIE, M. A. **The behavior of solder pastes in stencil printing with vibrating squeegee**. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology-Part C, New York, v.21, n.4, p. 317-324, out.
- [27] PFEIFER, T.; TORRES, F. **Manual de Gestión e Ingeniería de la Calidad**. Mira Editores, 1999.
- [28] BUTTARS, S.; ROWLAND, R. **Design for Manufacture**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=77468&KEYWORD=dfm%20index> Acesso em: 27 out. 2003.

- [29] SHINA, S. G. **Six Sigma for electronics design and manufacturing**. USA: McGraw-Hill, 2002.
- [30] ROWLAND, R. **DFM Rating Index**, PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=86454&KEYWORD=dfm%20index>. Acesso em: 30 out. 2003.
- [31] CUTLER-HAMMER. **Printed Circuit Board Design Guidelines**. Cutler-Hammer Industrial Controls Division Watertown. Disponível em: <http://www.xs4all.nl/~tersted/PDF_files/CutlerHammer/design.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2003.
- [32] PRASAD, R. P. **Part 1: General DFM Guidelines**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=86451&KEYWORD=dfm>. Acesso em: 27 out. 2003.
- [33] ORESJO, S.; ODBERT, B. **Charting a DFT Course for Limited-access Boards**, PennWell Corporation. Disponível em: http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=146253&KEYWORD=DFT>. Acesso em: 15 jan. 2004.
- [34] ROTONDARO, R. G. **Seis Sigma – Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços**. São Paulo: Ed. Atlas, 2002.
- [35] WINCHELL, W. **Inspection and Measurement in Manufacturing, keys to process planning and improvement**. USA: Society of Manufacturing Engineers, 1996.
- [36] MESSINA, W. S. **Statistical Process Control for Surface Mount Technology**. USA: Willian Samuel Messina, 1999.
- [37] RIBEIRO, J. L. D. **FMEA E FTA No Diagnóstico e Melhoria de Produtos e Processos**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 102 p. Apostila.

- [38] BENBOW, D. W.; BERGER, R. W.; ELSHENNAWY, A. K.; WALKER, H. F. **The Certified Quality Engineer Handbook**. USA: ASQ Quality Press Milwaukee, Wisconsin, 2002.
- [39] BRINKLEY, P. A., **Northern Telecom achieves improved quality by combining DOE and SPC**, Northern Telecom. Disponível em: <<http://deming.eng.clemson.edu/pub/tqmbbs/cases/spcdoe.txt>>. Acesso em: 24 abr. 2003.
- [40] MEYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. John Wiley & Sons, 1995.
- [41] INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA. **APQP - Planejamento Avançado da Qualidade do Produto e Plano de Controle**. 1997. Manual de Referência.
- [42] ANDERSON, J.; RUNGTUSANATHAN, M.; SCHROEDER, R. **A theory of quality management underlying the Deming management method**. The Academy of Management Review. Disponível em: <<http://www.umi.com/pqdweb>>. Acesso em: 13 nov. 2003.
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9004: Sistema de gestão da qualidade – Diretrizes para melhorias de desempenho**, 2000.
- [44] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 16949: Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations**, 2002.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9000: Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e vocabulários**, 2000.
- [46] DAVIS, III, W. **Using Corrective Actions to Make Matters Worse – By not Considering Variation**. Quality Progress, 2000.

- [47] DONATELLI, G. D.; SOARES, G. G.; MARQUES, C. C.; SCHMIDT, A. Estabilidade Estatística da Medição. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE METROLOGIA - METROSUL, Curitiba, 2002.
- [48] JURAN, J.M.; GRZYNA, F. M. **Juran's Quality Control Handbook**. 4 ed. McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [49] HUTCHINS, C. L. **Troubleshooting the Surface Mount and Fine Pitch Technology process**. USA: C. Hutchins and Associates, 1997.
- [50] IMAGING SYSTEMS NICOLET. **X-Ray Inspection "How It Works"**, Disponível em: <http://www.teradyne.com/prods/cbt/products/library/xray/wp_xrayhow.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2003.
- [51] KELLEY, B.; WEISGERBER, J. **Process Control**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=77361&KEYWORD=Step%20Process%20Control>. Acesso em: 14 jul. 2003.
- [52] BHAT, H.; CLARK D. **Using in-line inspection to improve PCB assembly yields**. Electronics Engineer. Disponível em: <http://www.eetasia.com/ARTICLES/1999DEC/1999DEC01_BT_QA_SMT_TA.PDF>. Acesso em: 17 nov. 2003.
- [53] TONG, P. **Using visual inspection in your PCB test strategy**. Electronics Engineer. Disponível em: <http://www.eetasia.com/ARTICLES/1998SEP/1998SEP01_BT_ST_QA_SMT_RR_PM_TA.PDF>. Acesso em: 03 jul. 2003.
- [54] ARENA, J.; MCKENZIE, R. **Test and Inspection**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=121726&KEYWORD=%22line%20efficiency%22>. Acesso em: 14 jul. 2003.
- [55] LEDDEN, J. W. **Modern PCB Test Strategies**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=83109&KEYWORD=DFT>. Acesso em: 16 jul. 2003.

- [56] VERMA, A. **Effective Test Strategies for Modern Printed Circuits Assemblies**. Teradyne Inc. Disponível em: <http://www.teradyne.com/prods/cbt/products/library/xray/effective_test_pcba_0208_english.pdf>. Acesso em: 23 out. 2003.
- [57] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **VIM: Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**. Brasília, 2000.
- [58] FUNDAÇÃO CENTROS DE REFERÊNCIAS EM TECNOLOGIAS INOVADORAS. **Metrologia para Certificação ISO 9000**. Florianópolis, 2002. 133 p. Apostila do curso.
- [59] AUTOMOTIVE INDUSTRIES ACTION GROUP. **Measurement Systems Analysis (MSA)**, 3 ed. Troy, 2002. Manual de referência.
- [60] WHEELER, D. J.; LYDAY, R. W. **Evaluating the Measurement Process**. 2 ed. Tennessee: SPC Press, Knoxville, 1989.
- [61] BOSCH GMBH, **Quality assurance in the Bosch group No. 10 – Technical statistics: Capability of measuring facilities**. Stuttgart, 1999. Manual de referência.
- [62] WINDSOR, S. E. **Attribute Gage R&R**. Six Sigma Forum Magazine. Disponível em: <http://www.asq.org/pub/sixsigma/past/vol2_issue4/ssfmv2i4windsor.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2004
- [63] VALE, G. M. V. **Desempenho Empresarial - Proposta de um Sistema de Indicadores para MPE**. Revista Indicadores da Qualidade e Produtividade, 1/94, ano 2, nº 1, jun./94. Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.
- [64] ROWLAND, R. **Metrics: How Well Do You Measure Up?**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=113315&KEYWORD=metrics>. Acesso em: 12 nov. 2003.

- [65] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **SMC-WP-004**: Design for Success, 1997.
- [66] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-D-279**: Design for Reliable Surface Mount Technology Printed Board Assemblies, 1996.
- [67] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC-SM-782A**: Surface Mount Design and Pattern Standard, 2000.
- [68] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC-7095**: Design and Assembly Process Implementation for BGA's, 2000.
- [69] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **J-STD-013**: Implementation of Ball Grid Array and Other High Density Technology, 1996.
- [70] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-7530**: Guidelines for Temperature Profiling for Mass Soldering (Reflow & Wave) Processes, 2001.
- [71] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-TR-460A**: Trouble-Shooting Checklist for Wave Soldering Printed Wring Boards, 1984.
- [72] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-S-816**: SMT Process Guideline & Checklist, 1993.
- [73] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-DRM-53**: Introduction to Electronic Assembly Desk Reference Manual.
- [74] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-PD-335**: Electronic Packing Handbook, 1989.
- [75] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-CM-770D**: Component Mounting Guidelines for Printed Board, 1996.

- [76] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **J-STD-033A**: Standard for Handling, Packing, Shipping and Use of Moisture/Reflow Sensitive Surface Mount Devices, 2002.
- [77] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-7711**: Rework of Electronic Assemblies, 1998.
- [78] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-7525**: Stencil Design Guidelines, 2000.
- [79] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC 9850**: Surface Mount Placement Equipment Characterization, 2002.
- [80] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **J-STD-001C**: Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies, 2000.
- [81] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC-A-610C**: Acceptability for Electronic Assemblies, 2001.
- [82] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-MI-660**: Incoming Inspection of Raw Materials Manual, 1984.
- [83] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC-A-600F**: Acceptability for Printed Boards, 1999.
- [84] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **J-STD-004**: Requirements for Soldering Fluxes, 1996.
- [85] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **J-STD-005**: Requirements for Soldering Pastes, 1995.
- [86] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC-9701**: Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments, 2002.
- [87] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC-7912**: Calculation of DPMO & Manufacturing Indices for Printed Board Assemblies, 2000.

- [88] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC-9261: In-Process DPMO and Estimated Yield for PWAs**, 2002.
- [89] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9001: Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos**, 2000.
- [90] PRASAD, R. P. **Surface Mount Technology: Principles and Practice**. USA: Chapman & Hall, 1997.
- [91] COLL, B. **The use of process metrics to predict quality Performance**. Manufacturers' Services Ltd. Disponível em: <http://www.isixsigma.com/offsite.asp?A=Fr&Url=http://www.msl.com/technical_capabilities/full_prometrics.html>. Acesso em: 17 out. 2003.
- [92] VERMA, **Management of DPMO metrics reduces the cost of PCB assembly**. Global SMT & Packaging. Disponível em: <<http://www.teradyne.com/prods/cbt/products/library/aoi/Verma%20Global%20SMT%20April%2003.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2003.
- [93] POELDERL, A. **AwareTest xi a test strategy for complex boards**. Agilent Technologies. Disponível em: <http://www.itff.no/aktiviteter/2002/testforum/program/1024389507/Aware-Poelderl_Test_Testforum.pdf>. Acesso em: 01 out. 2003.
- [94] ORESJO, S. **The Complexity Factor**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=77405&KEYWORD=complexity%20factor>. Acesso em: 27 out. 2003.
- [95] MANGIN, C. H. **DPMO – A tool for achieving world-class process quality**. PennWell Corporation. Disponível em: <http://smt.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=80849&KEYWORD=charles%20henri>. Acesso em: 27 out. 2003.
- [96] SCHMITT, R.; GUILLET. J. M. **Machine Capability Measurement on SMT Equipment**. SMT Express. Disponível em: <<http://www.smtnet.com/express/200205/machine/>>. Acesso em: 12 Fev. 2004.

- [97] LUCA, L. V. de. **Recomendações para a utilização de ensaios de estresse térmico em busca da confiabilidade em produtos eletrônicos.** Florianópolis, 2004, 101 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial), Universidade Federal de Santa Catarina.