

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXILIAR NA GARANTIA DA
QUALIDADE NA PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES**

Tese submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS MARINOVIC DORO

Florianópolis, Setembro de 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXILIAR NA GARANTIA DA
QUALIDADE NA PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES**

MARCOS MARINOVIC DORO

**Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing. – Orientador

Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng. – CO-Orientador

Eduardo Alberto Fancello, D.Sc. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing. – Presidente

Herman Augusto Lepikson, Dr. Eng.

Sergio Bampi, Dr. Ing.

Fernando Antonio Forcellini, Dr. Eng.

Marcelo Ricardo Stemmer, Dr. Ing.

*Dedico este trabalho ao meu pai e minha mãe que
formam o maior alicerce de minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por permitir a realização deste doutorado.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), por ter financiado minha bolsa de estudos.

Aos meus orientadores, Prof. Carlos Alberto Schneider e Prof. Gustavo Daniel Donatelli, por terem me guiado ao longo deste trabalho.

Aos membros da banca, Professores Herman Lepikson, Sergio Bampi, Fernando Forcellini e Marcelo Stemmer, por terem dado uma importante contribuição para este trabalho.

Ao LABelectron, a Produza, a Megaflex Sul e a C-Pack, que permitiram viabilizar a aplicação prática deste trabalho, em especial ao Mário Albuquerque da Produza, ao Marcos e o Eduardo da Megaflex Sul e ao José Maurício da C-Pack.

A todos os colaboradores da Fundação CERTI, em especial aos membros do CPC, Carlos Fadul, Thiago Mantovani, Jane Gaspar, Tânia Henke, Nébel S. Afonso, Alexandre Watanabe, Renato Scavone, Victor Rocha, Renato Larroyd e demais, que sempre me ajudaram e apoiaram ao longo desta caminhada.

Ao meu pai e minha mãe, por ter passado um tempo em Florianópolis comigo, principalmente nos últimos anos deste trabalho quando as coisas estavam mais difíceis.

Ao meu irmão Li por termos trocado idéias várias vezes pelo Skype quando eu estava meio solitário aqui em Florianópolis.

A todos meus familiares que sempre me apoiaram para a realização dos meus estudos, em especial a tia Norma.

A cidade de Florianópolis, por terem praias nas quais pude passar várias horas de reflexão e inspiração dentro mar, tentando sempre pegar boas ondas.

Eu poderia continuar sem parar e sei que me esqueci de muita gente, mas obrigado a todos vocês também.

*“Mais do que mestres e doutores, o mundo necessita de
pessoas que vivam o evangelho.”*

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla	Inglês	Português
AOI	<i>Automatic Optical Inspection</i>	Inspeção Óptica Automática
AXI	<i>Automatic X-ray Inspection</i>	Inspeção Raio-X Automática
BOM	<i>Bill of Materials</i>	Lista de Materiais
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	Projeto Assistido Por Computador
CCP	<i>Continuous Process Control</i>	Controle Contínuo do Processo
CEP	<i>Statistical Process Control</i>	Controle Estatístico de Processo
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>	Controle Numérico Computadorizado
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i>	Manufatura Integrada por Computador
CM	<i>Contract Manufacturing</i>	Empresa Prestadora de Serviços
COB	<i>Chip-On-Board</i>	Tipo de componente eletrônico sem encapsulamento
Cp,Cpk, Cpm	<i>Process Capability indexes</i>	Índices de Capacidade de Processo
CUSUM	<i>Cumulative Sum</i>	Soma Acumulativa
DFMEA	<i>Design Failure Modes and Effects Analysis</i>	Análise dos Modos de Falhas do Projeto e seus Efeitos
DLL	<i>Dynamic-link library</i>	Biblioteca de Ligação Dinâmica
DOE	<i>Design of Experiments</i>	Projeto De Experimentos
DPMO	<i>Defects Per Million Opportunities</i>	Defeitos Por Milhões de Oportunidades
DPU	<i>Defects Per Unit</i>	Defeitos Por Unidade
EWMA	<i>Exponentially Weighted Moving Average</i>	Média Móvel Ponderada Exponencialmente
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>	Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos
FMS	<i>Flexible Manufacturing Systems</i>	Sistema Flexível de Manufatura
FPY	<i>First Pass Yield</i>	Rendimento de Montagem
FT	<i>Functional Test</i>	Teste Funcional
GT	<i>Group Technology</i>	Tecnologia de Grupo
ICT	<i>In-Circuit Test</i>	Teste de Circuito

JIT	<i>Just-In-Time</i>	
MSA	<i>Measurement System Analysis</i>	Análise do Sistema de Medição
MVI	<i>Manual Visual Inspection</i>	Inspeção Visual Manual
NC	<i>Non-Conformity</i>	Não Conformidade
NNA	<i>Nearest Neighbor Algorithm</i>	Algoritmo do Vizinho Mais próximo
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>	Empresa Detentora da Marca
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i>	Planejar, Executar, Verificar, Controlar
PFMEA	<i>Process Failure Modes and Effects Analysis</i>	Análise dos Modos de Falhas do Processo e Seus Efeitos
PCI	<i>Printed Circuit Board</i>	Placa de Circuito Impresso
PPL	<i>Small Lots Production</i>	Produção em Pequenos Lotes
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>	Desdobramento da Função Qualidade
SMT	<i>Surface Mount Technology</i>	Tecnologia de Montagem em Superfície
SCQ	<i>Continuous Quality Inspection</i>	Supervisão Contínua da Qualidade
SE	<i>Expert System</i>	Sistema Especialista
SEQ	<i>Statistical Quality Inspection</i>	Supervisão Estatística da Qualidade
SI2PL	<i>Integrated System for Small Lots Production</i>	Sistema Integrado para Produção em Pequenos Lotes
SMED	<i>Single Minute Exchange of Dies</i>	Troca Rápida de Ferramentas
THT	<i>Through-Hole Technology</i>	Tecnologia Através de Furo
TI	<i>Information Technology</i>	Tecnologia da Informação

RESUMO

As demandas dos clientes e o curto ciclo de vida dos produtos estão obrigando os sistemas produtivos a se deslocarem em a direção a uma grande variedade de produtos com tamanho de lotes pequenos. Em consequência, a produção em pequenos lotes está sendo praticada por um número cada vez maior de empresas.

Atingir a qualidade desejada na produção em pequenos lotes é um grande desafio, pois é essencial atuar de forma preventiva, flexível e dinâmica. No entanto, é constatado que a maioria das empresas não está preparada para a produção em pequenos lotes. Muitos dos problemas da qualidade ainda são enfrentados na base da intuição, do bom senso ou da coragem, o que torna este tipo de produção repleta de riscos e incertezas. Esses são sinais que dão mostras da necessidade de desenvolver novas idéias, métodos e ferramentas, a fim de responder mais adequadamente a realidade dessas empresas.

Este trabalho propõe uma solução integrada, estruturada na forma de um modelo conceitual, para dar suporte ao gerenciamento da qualidade na produção em pequenos lotes, com o intuito de atuar nos problemas de qualidade típicos da produção em pequenos lotes. O propósito geral desse trabalho foi integrar os métodos de engenharia da qualidade a uma base de conhecimento contendo informações sobre o produto e o processo, utilizando recursos da Inteligência Artificial. O modelo proposto, nomeado de SI2PL (Sistema Integrado para Produção em Pequenos Lotes), deriva em uma ferramenta computacional capaz de armazenar e tornar rapidamente acessíveis aos diferentes níveis organizacionais da empresa informações sobre a qualidade do produto e o desempenho dos processos. Além disso, esta ferramenta agrega Sistemas Especialistas para interagir no planejamento e controle da qualidade dos processos.

Os resultados obtidos com a implantação real em duas empresas de seguimentos industriais distintos apontaram que o SI2PL melhorou o sistema de garantia da qualidade, auxiliou na solução dos problemas da qualidade e incentivou a melhoria contínua da qualidade. Quanto à adequação de sua estrutura e os propósitos estabelecidos, o modelo do SI2PL mostrou ser totalmente viável e suficientemente flexível.

Palavras-chave: Produção em pequenos lotes, Inspeção, Garantia da qualidade, Planejamento da Qualidade, Plano de controle, Software, Sistemas Especialistas.

ABSTRACT

The client's demands and short product life cycles are forcing productive systems to move towards high product diversity and small lots. Consequently, the small lot production practice has grown in many companies.

It is a big challenge to reach desired quality in small lot production, since it is essential to act preventively, flexibly, and dynamically. Nevertheless, it is proved that most companies are not prepared for small lot production. Many quality problems in small lot production are still confronted by means of intuition, common sense, or courage, which makes small lot production replete with risks and uncertainties. These signals show the need for the development of new ideas, methods, and tools, in order to answer more suitably the reality of these companies.

This work proposes an integrated solution, structured in the form of a conceptual model, to provide support for quality management in small lot production, in order to act upon the problems of quality, typical of small lot production. The general aim of this work was to integrate quality engineer methods with a knowledge base, containing information about product and process, and to apply the resources of Artificial Intelligence. The proposed model, denominated SI2PL (Integrated System for Small Lot Production, in Portuguese), generates a computational tool capable of storing and allowing accessibility, to different levels of the organization, information about product quality and process performance. In addition, this tool aggregates Expert Systems to interact in quality planning and control.

The outputs obtained from the actual implementation in two companies of different industrial segments indicated that the SI2PL improved the system of quality assurance, assisted in solving quality problems and encouraged continuous improvement. In relation to its structure, and purposes established, the SI2PL model showed to be fully viable and sufficiently flexible.

Keywords: Small lot production, Inspection, Quality Assurance, Quality Planning, Control Plan, Software, Expert Systems.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 HISTÓRICO DA PRODUÇÃO	11
1.2 A PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES.....	15
1.2.1 Características da produção em pequenos lotes	17
1.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	20
1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO	23
1.5 A TESE.....	24
1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE	24
2 ASPECTOS RELEVANTES À GARANTIA DA QUALIDADE PARA A PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES	26
2.1 CICLOS DE CONTROLE DA QUALIDADE	27
2.2 PLANEJAMENTO DA INSPEÇÃO	28
2.2.1 Plano de controle da qualidade	29
2.3 EXECUÇÃO DA INSPEÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS	30
2.3.1 Análise dos dados coletados pela inspeção	32
2.3.2 Confiabilidade da inspeção	33
2.3.3 Aspectos metrológicos	34
2.4 DIFICULDADES DE GERENCIAR A QUALIDADE NUM AMBIENTE DE PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES	36
2.5 PRINCIPAIS AÇÕES DE APOIO À PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES	38
3 CONCEITO DE UM SISTEMA INTEGRADO PARA ASSISTIR À GARANTIA DA QUALIDADE NA PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES	42
3.1 VISÃO GERAL DO SI2PL.....	43
3.1.1 Sistemas Especialistas no SI2PL	45
3.1.2 Estrutura organizacional e responsabilidades requeridas	48
3.1.3 Pré-requisitos da qualidade para operacionalização do SI2PL	50
3.2 DETALHAMENTO DO SI2PL	51
3.2.1 Introdução de um novo produto (Módulo A)	51

3.2.2 Busca por similaridade (Módulo B)	53
3.2.3 Geração do plano de controle da qualidade (Módulo C)	54
3.2.4 Predição da qualidade (Módulo D)	56
3.2.5 Registro dos controles (Módulo E)	58
3.2.6 Inspeção (Módulo F)	59
3.2.7 Diagnóstico do processo (Módulo G)	60
3.2.8 Indicadores da qualidade (Módulo H)	62
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O SI2PL	64
4 DESENVOLVIMENTO DO SI2PL PARA OS PROCESSOS DE MONTAGEM DE PLACAS ELETRÔNICAS	67
4.1 O PROCESSO DE MONTAGEM DE PLACAS ELETRÔNICAS	67
4.1.1 Garantia da qualidade nos processos de montagem de placas eletrônicas ...	68
4.1.2 Relevância da aplicação do modelo SI2PL nos processos de montagem de placas eletrônicas	70
4.2 O PCBA SMARTQUALITY	71
4.2.1 Introdução do novo produto	73
4.2.2 Planejamento da inspeção	76
4.2.3 Inspeção	82
4.2.4 Controle dos dados da inspeção	84
5 ESTUDO DE CASO - IMPLANTAÇÃO DO SI2PL NO LABELECTRON	90
5.1 A EMPRESA	90
5.2 INFRA-ESTRUTURA	91
5.3 CADASTRO DAS INFORMAÇÕES	93
5.4 SE DE DIAGNÓSTICO DO PROCESSO	94
5.5 SE DE BUSCA POR SIMILARIDADE	97
5.6 SE DE PREDIÇÃO DA QUALIDADE	99
5.7 TREINAMENTOS	104
5.8 RESULTADOS VISUALIZADOS PELA EMPRESA APÓS A IMPLANTAÇÃO DO SI2PL	105

5.9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	109
6 CONCLUSÕES E VISÃO DE FUTURO	111
REFERÊNCIAS	115
APÊNDICE A.....	124

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO DA PRODUÇÃO

Até o século XVII, as atividades de produção de bens eram desempenhadas por artesãos. Com diversas especializações e denominações, essa classe abarcava praticamente todas as profissões liberais então existentes: pintores, escultores, marceneiros, vidraceiros, sapateiros, arquitetos, armeiros e assim por diante.

O mestre artesão, proprietário de uma oficina, recebia aprendizes, geralmente membros da família ou, então, jovens talentosos da região, para estudarem o ofício. Estes permaneciam na oficina por um período de até quinze anos, aprendendo a dominar as técnicas da profissão. Os novos artesãos uniam-se em corporações de ofício e os bons artesãos eram capazes de realizar obras refinadas e de grande complexidade e possuíam o domínio completo do ciclo de produção, já que negociavam com o cliente o serviço a ser realizado, executavam estudos e provas, selecionavam os materiais e as técnicas mais adequadas, construía o bem e o entregavam.

Cada bem produzido era personalizado e incorporava detalhes solicitados pelo cliente: o número de variações era quase ilimitado; o volume de produção era baixo, pois dependia da capacidade do artesão em produzir no regime de mão de obra intensiva; os produtos tinham geralmente boa qualidade, já que o artesão era um especialista, e na maioria das vezes, dono do negócio; o ciclo de vida dos produtos era muito longo devido a não haver necessidade de novos lançamentos para garantir vendas.

A partir da invenção das máquinas-ferramenta, ficara demonstrada a possibilidade de mecanizar o trabalho e produzir um bem em série, iniciando assim a revolução industrial. Mas foi em 1776, com o desenvolvimento da máquina a vapor por James Watt, que o homem passou a dispor de um recurso prático para substituir o trabalho humano ou a tração animal por outro tipo de energia. Uma das atividades rapidamente mecanizadas foi a produção de têxteis. A partir de então, a velocidade da máquina passava a impor o ritmo da produção e os locais de trabalho passavam a ser construídos em função das necessidades impostas pelos equipamentos: era o nascimento das fábricas ^[1].

A revolução industrial lançou a base de um novo tempo, transformando profundamente não só o mundo das organizações, mas toda a sociedade. O homem, antes um artesão, passa a ser um operário coadjuvante da máquina. A produção torna-se

padronizada e o número de opções colocadas à disposição do cliente é limitado. O trabalho é rotineiro e padronizado e o trabalhador perde o contato com o cliente e com a visão global dos objetivos da empresa. É a divisão do trabalho entre aqueles que pensam (gerentes, administradores, engenheiros) e aqueles que executam (operários). A economia deixou de ter uma base artesanal e manufatureira para se firmar na produção industrial e mecanizada.

Essa verdadeira revolução na maneira como os produtos eram fabricados trouxe consigo a necessidade de estruturar as indústrias e de dar-lhes uma organização adequada, melhorando a sua eficiência e produtividade, o que levou a diversos estudos sobre o seu funcionamento, o seu papel na economia e a sua administração. Os principais economistas políticos dos séculos XVIII e XIX ocuparam-se desses temas. Também surgiram, nesse período, as primeiras iniciativas para se criar sistemas de medidas e normas industriais. Mas foi no início do século XX, com os trabalhos de Fayol e de Taylor, que os conceitos de administração de empresas consolidaram-se. Os seus trabalhos têm, até hoje, uma influência na forma como as organizações operam e se estruturam e na visão predominante sobre a qualidade.

Henry Fayol viveu na França. Engenheiro de minas, dedicou-se desde os vinte e cinco anos de idade a atividades gerenciais, com notável sucesso. Em 1916, já idoso, publicou a obra *Administração Industrial e Geral* ^[2], originadora da escola da administração tradicional, na qual defende a estruturação da empresa em seis funções básicas: técnica, comercial, financeira, contábil, administrativa e de segurança. Fayol subdividiu as atividades da função administrativa em prever, organizar, comandar, coordenar e controlar.

Frederick Winston Taylor foi operário, capataz e engenheiro. Entre 1885 e 1903 dedicou-se a estudar a organização das tarefas e os tempos e movimentos gastos por um operário em sua execução. Também idealizou diversas formas de remuneração que premiassem os profissionais mais produtivos, pois acreditava que o homem fosse estimulado pelo dinheiro, uma espécie de *homo economicus* que encontrava no salário a sua razão de trabalhar. Em 1911, Taylor divulga sua obra *Princípios da Administração Científica* ^[3], em que focaliza a estruturação global da empresa e defende a aplicação dos princípios da supervisão funcional, da padronização de procedimentos, ferramentas e instrumentos, do estudo de tempos e movimentos, do planejamento de tarefas e de cargos e dos sistemas de premiação por eficiência. Formalizou os conceitos de divisão do trabalho, de especialização profissional e de administração pela exceção¹.

¹ O princípio da exceção é fundamentado em um sistema de informação que acusa apenas os desvios ou afastamentos, omitindo as ocorrências normais, tornando-os comparativos e de fácil utilização.

Usando os princípios de Taylor, Henry Ford ^[4], com o seu célebre automóvel “modelo T” lançado em 1908, cria o conceito de produção em massa, caracterizada por grandes volumes de produtos extremamente padronizados e de baixíssima variação. Com a produção em massa, novos conceitos foram introduzidos, tais como: linha de montagem e posto de trabalho, estoques intermediários, arranjo físico, balanceamento de linha, manutenção preventiva, mecanização, automação, fluxograma de processos, motivação, monotonia do trabalho e sindicatos. A divisão funcional levou à criação dos departamentos de controle da qualidade e ao aperfeiçoamento das técnicas de inspeção. Por volta de 1930, Harold Dodge, dos Laboratórios Bell, desenvolveu as primeiras tabelas para planejar o processo de inspeção ^[5], os chamados planos de inspeção. Também nessa época, Walter Shewhart introduziu os conceitos de controle estatístico de processos e de ciclo de melhoria contínua ^[6].

A moderna concepção de gestão da qualidade total, que consolidaria a engenharia da qualidade num corpo de conhecimentos consistente, desenvolveu-se nos anos 50 a partir dos trabalhos de Armand Feigenbaum ^[7], Joseph Juran ^[8] e Edwards Deming ^[9]. Com isso, a produtividade e a qualidade aumentaram velozmente, e foram obtidos produtos bem mais uniformes, sobretudo em razão da padronização e da aplicação de técnicas de controle estatístico da qualidade.

O Japão foi o grande responsável por vários avanços competitivos da produção ^[10]. A partir dos anos 50 os japoneses iniciaram o desenvolvimento de programas de melhoria da qualidade. Rapidamente, começaram a se desenvolver novas técnicas e sistemas de produção que permitiram alcançar um elevado grau de qualidade, associado a níveis de falhas e de perdas ínfimas, medidas em ppm (partes por milhão) aproximando-se, na prática, do ideal de produção com “zero defeito”.

De início, os japoneses desenvolveram técnicas para trabalhar em equipe e melhor aproveitar a competência de profissionais em apoiar a melhoria de processos. Posteriormente, durante o período de 1975 a 1985, desenvolveram novas formas de organização da produção, que vieram a caracterizar a denominada produção enxuta ^[11]. Para chegar-se ao completo domínio de tais técnicas e incorporá-las ao processo produtivo, é necessário trilhar um longo caminho, que se inicia pela preparação cultural da empresa. O foco da gestão japonesa está na preparação do profissional, que domina plenamente, quase que por reflexo, as técnicas de trabalho em equipe, de organização e limpeza do local de trabalho, de abordagem sistematizada dos problemas ^[1].

Nos anos 80, a indústria japonesa já oferecia ao cliente a possibilidade de escolha de diversas opções de configuração do produto. O processo produtivo dentro desse modelo

passa a focar-se na produção em pequenos lotes e grandes variedades. A mudança da produção em massa para a produção em pequenos lotes foi caracterizada pela flexibilidade, buscando a superação da rigidez do modelo “fordista”, pelo uso de novas tecnologias produtivas, novas formas organizacionais, como por exemplo, o *just-in-time*², e novas técnicas de trabalho.

A globalização da economia acentuou a concorrência entre as empresas. Durante muito tempo as empresas competiram simplesmente com base em preço. No entanto, com a entrada de novos concorrentes, além do preço, a qualidade passou a ser fator crítico de sucesso de mercado. Na medida em que cada vez mais empresas foram dominando a competência de produzir com qualidade, novos atributos diferenciadores, como confiabilidade, prazo e inovação, passaram a ser cumulativamente demandados pelo mercado. Em decorrência da desaceleração da produção em massa, as empresas viram-se obrigadas a oferecerem ao consumidor uma diversificação cada vez maior de produtos fabricados em séries cada vez menores. Isso fez com que o simples domínio e aplicação do conjunto de técnicas legado por Taylor, Ford e seus discípulos, tornar-se obsoleto e insuficiente para as empresas manterem-se competitivas no mercado ^[12].

A Figura 1.1 resume o histórico da produção, destacando alguns dos fatos essenciais que marcaram essa evolução.

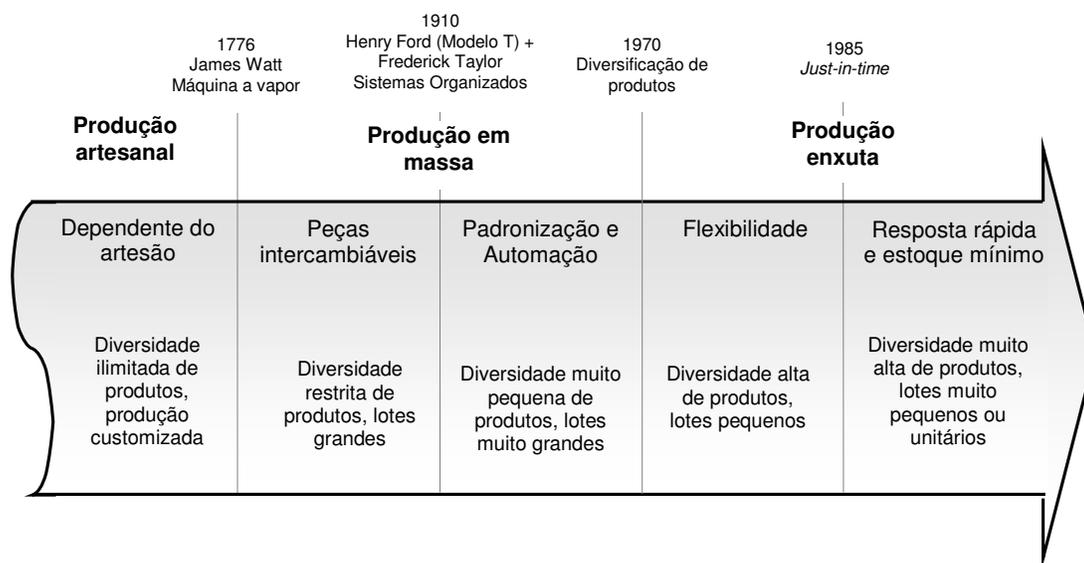


Figura 1.1 - Histórico evolutivo da produção (adaptado de [10])

² O *Just-in-time* é uma expressão ocidental para uma filosofia e uma série de técnicas desenvolvidas pelos japoneses, a qual inclui aspectos de administração de materiais, gestão da qualidade, arranjo físico, projeto de produto, organização do trabalho e gestão de recursos humanos.

Ao longo desse processo de modernização da produção, cresce em importância a figura do consumidor. É tão grande a atenção dispensada ao consumidor que este, em muitos casos, já especifica em detalhes o “seu” produto. Assim, caminha-se para a produção personalizada, que, sob certos aspectos, é um “retorno ao artesanato” sem a figura do artesão, que passa a ser substituído por modernas fábricas.

1.2 A PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES

O tipo de sistema produtivo, que por sua vez está diretamente vinculado ao tipo e a natureza dos produtos, assume um papel vital para determinar a disposição espacial dos recursos de produção, as estratégias de atribuição dos meios, as políticas de estocagem, o dimensionamento dos lotes, os tipos de flexibilidade suportados, os parâmetros de avaliação a serem adotados, entre outros^[13].

A classificação dos sistemas produtivos não é nem simples nem universal, diferentes tipos de classificações são adotados, como por exemplo:

- Baseado em quantidades produzidas^{[14], [15]};
- Baseado em variedade e volume^[13];
- Baseado em tempo entre unidades sucessivas e complexidade^[16];
- Baseado em variedade, volume, leiaute e fluxo de material^[17].

Na maior parte das formas de classificação adotadas enquadra-se um tipo de sistema de produção caracterizado por um baixo volume de produção e uma grande variedade de produtos. Entretanto, ainda é passível de discussão o sistema produtivo que nesse trabalho é chamado de produção em pequenos lotes. Levando em consideração estas discordâncias, distintas definições são apresentadas por diferentes autores.

Hitomi^[15] destaca a produção em pequenos lotes ou multi-produto como sendo o tipo de produção no qual uma grande variedade de produtos é manufaturada num curto período de tempo, sendo que o volume de produção para cada produto é muito baixo.

De acordo com Pyzdek^[18], um ambiente de produção de corrida curta é aquele em que um grande número de tarefas, envolvendo diferentes produtos, é executado em um ciclo de produção de tipicamente uma semana ou mês. Ele descreve que existem situações em que poucos produtos do mesmo tipo são produzidos e casos extremos que somente um único produto é produzido.

Del Castilho *et al.*^[19] descrevem produção em corrida curta como sendo aquela em que produtos são produzidos em pequenas quantidades. Contudo, eles diferenciam a

produção em dois casos. No primeiro caso, a produção é feita usando um *setup* completamente diferente, gerando uma produção não repetitiva. O segundo caso é quando muitos lotes de tamanhos pequenos de produtos similares são produzidos numa mesma máquina ou linha de produção com sucessivas operações de *setup* semelhantes, apresentando uma produção repetitiva.

Juran *et al.* [8] também relatam que embora o termo *job shop* seja largamente usado para definir uma produção com alta variedade de produtos, o mesmo é vagamente definido. Eles descrevem que não existe um parâmetro único que distingue o *job shop* da produção em massa e identificam algumas características básicas, tais como: porcentagem de ordens de produção repetidas, quantidades de ordens de produção por semana, tipos de produtos, etc.

Para Lin *et al.* [20] produção em corrida curta é uma situação de produção em que as demandas dos clientes e o curto ciclo de vida dos produtos fazem o ambiente de manufatura deslocar em direção a uma larga variedade de produtos com lotes cada vez menores.

Wheeler [21] relata que devido à tendência atual de redução dos estoques, as corridas de produção estão se tornando mais curtas. Por esta razão a produção de corrida curta lida essencialmente com lotes pequenos e com curto tempo de duração.

Jadhav [22] em seu trabalho de pesquisa analisou as definições para a produção em corrida curta e propôs uma matriz, baseada em 30 trabalhos publicados no período de 1989 a 2001, com os termos mais comumente usados para descrever a produção em corrida curta. Jadhav afirma que o termo mais comum usado para definir produção em corrida curta é o baixo volume ou o pequeno lote. Outros termos usados incluem alta variedade de produtos, *setups* freqüentes, produção não repetitiva e curto tempo de produção por lote. Ele observou que existe uma sobreposição nestas características. Os processos com curto tempo de produção são caracterizados por *setups* freqüentes. Processos que produzem um alto volume de um produto particular são geralmente caracterizados por uma produção repetitiva. E assim, outras características de sobreposição são geradas dependendo do tipo de processo produtivo. Portanto, ele concluiu que as características chaves usadas para caracterizar os processos produtivos são: volume, tempo de produção por lote e variedade de produto (Figura 1.2).

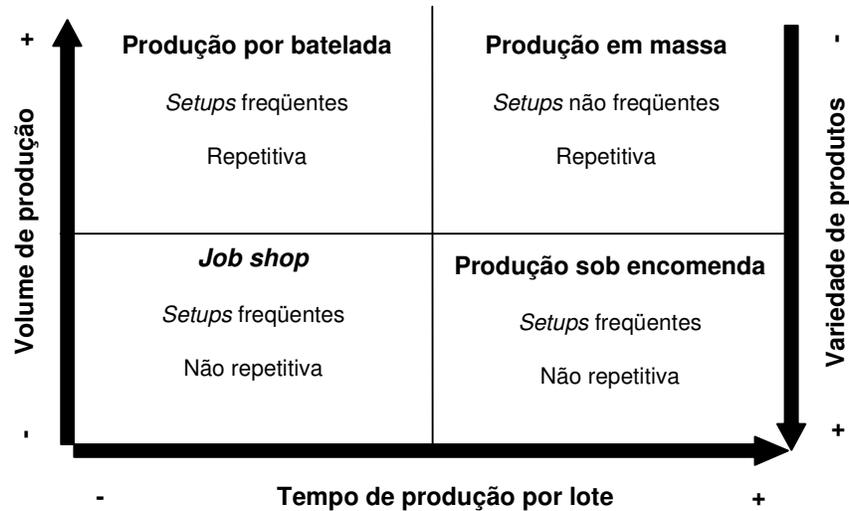


Figura 1.2 - Classificação dos sistemas produtivos de acordo com as características chaves ^[22]

Assim sendo, as características mais comuns que descrevem o sistema produtivo que neste trabalho é chamado de produção em pequenos lotes (PPL) são:

- baixo volume de produção;
- curto tempo de produção por lote;
- alta variedade de produtos.

Deve ficar claro que não é possível definir valores exatos para as características apresentadas acima para que a produção seja classificada como de pequeno lote. Na realidade, dependendo do tipo de produto, do ambiente de manufatura considerado, do estágio de fabricação, do grau de controle sobre o processo entre outros fatores, as quantidades a considerar podem variar significativamente.

1.2.1 Características da produção em pequenos lotes

A flexibilidade é a característica chave para a PPL. O sistema deve ser capaz de reagir rapidamente a mudanças na demanda dos clientes, mudanças no projeto do produto ou na diversidade de produtos. Com relação à produção, a flexibilidade deve ocorrer nos seguintes aspectos ^[23]:

- Operação de equipamento: troca rápida de ferramentas, sem ajustes e detecção automática de erros;
- Setup: fácil de ajustar, troca rápida de ferramentas e matrizes;
- Processos: habilidade para lidar com uma diversidade de produtos;

- Capacidade ou volume: habilidade para aumentar ou reduzir a taxa e o volume de produção.

A manufatura automatizada oferece uma variedade de benefícios, sendo que uma de suas mais importantes vantagens é a habilidade em responder rapidamente as trocas de demandas e as trocas de produtos, característica de um ambiente de PPL. Um sistema de manufatura flexível (FMS) visa atingir um nível de eficiência na manufatura de diferentes tipos de produtos similar ao da produção em massa de um único tipo de produto.

Um FMS consiste de um grupo de máquinas de produção programáveis integradas a equipamentos de alimentação automática de materiais, que estão sob comando de um controlador central, a fim de produzir uma variedade de peças com uma taxa de produção e quantidades não uniformes. As máquinas ou estações de trabalho executam operações sobre as peças, sendo que cada operação requer um número de ferramentas inseridas nos magazines destas máquinas. Um dispositivo executa a troca automática das ferramentas durante a produção. Devido a esta troca ser relativamente rápida, a máquina pode executar várias operações com um tempo de *setup* virtualmente nulo entre as operações, caso a ferramenta requerida esteja presente no magazine ^[24].

Normalmente uma empresa que lida com a PPL possui o leiaute de seu sistema de manufatura chamado de *job shop* ^{[8], [15], [23]}. O sistema *job shop* é caracterizado por uma grande variedade de processos de manufatura, máquinas flexíveis e um leiaute funcional. Isto significa que as máquinas são agrupadas por função, tal como posicionar todos os tornos juntos, todas fresadoras juntas, etc. As peças são encaminhadas no chão de fábrica em pequenos lotes para as várias máquinas, sendo que os trabalhadores devem ter uma habilidade relativamente alta para efetuar diferentes tarefas. O sistema de manufatura com células interligadas também é comum na PPL. Nas células, operações e processos são agrupados de acordo com a seqüência de produção que é necessária para fazer um grupo de produtos. Esta disposição se parece com o leiaute em linha, mas é projetada para ter flexibilidade. A célula é muitas vezes configurada em forma de U, permitindo aos trabalhadores moverem-se de uma máquina para outra, carregando e descarregando peças. A célula normalmente inclui todos os processos necessários para a fabricação de uma peça ou para uma montagem completa ^[23].

Geralmente as empresas que produzem em pequenos lotes são de pequeno e médio porte que fabricam produtos ou componentes para empresas de manufatura maiores

(OEM³) ou prestam serviços para grandes companhias de diversos setores (CM⁴). Alguns exemplos típicos onde ocorre PPL são ^[8]:

- equipamentos complexos grandes, tais como: equipamentos agrícolas, aeronaves e automóveis especiais;
- componentes, como por exemplo: placas eletrônicas, dispositivos pequenos, embalagens plásticas, componentes eletrônicos e componentes automotivos;
- produtos acabados simples, tais como: livros, sapatos e móveis;
- produtos produzidos sob encomenda, tais como: ferramentas, peças fundidas, plásticos moldados e peças de máquinas.

A PPL é complexa e difícil de ser gerenciada. Algumas das principais dificuldades que tangem a PPL são destacadas a seguir ^{[10], [13], [15], [8]}:

- Complexidade no gerenciamento do estoque: geralmente a estratégia “produzir por pedido” (*make-to-order*) é utilizada. Como consequência, problemas como a falta de materiais e insumos podem ocorrer durante a produção. Estes problemas podem originar deficiências de qualidade no produto, atrasos de entrega e, conseqüentemente, lucros menores. Além disso, a variedade de itens produzidos e a diversificação dos volumes de produção e datas de entrega gera a necessidade de produzir vários produtos simultaneamente, resultando normalmente numa elevada quantidade de estoque intermediário.
- Longos tempos de atravessamento: a necessidade de realizar um novo *setup* quase sempre que o produto entra em produção, a espera por compras de insumos e as constantes mudanças de especificações do produto resultam em um longo tempo para que o serviço seja totalmente executado, desde sua solicitação até sua entrega.
- Alta variedade de operações de trabalho: a grande diversidade de produtos gera diferentes formas de conversão dos materiais de entrada em produtos acabados, que variam desde simples até complicadas operações. Conseqüentemente, os operadores devem ter uma habilidade relativamente alta para efetuar diferentes tarefas.
- Complexidade em dimensionar a capacidade produtiva: devido à natureza dinâmica da demanda para a variedade de produtos, a capacidade produtiva da

³ OEM - Original Equipment Manufacturer: empresa detentora da marca

⁴ CM - Contract Manufacturer: empresa prestadora de serviços

empresa pode estar ora em excesso, ora deficiente, o que resulta em tempos de trabalho excessivos ou ociosos.

- Falta de previsibilidade: as freqüentes trocas nas especificações do produto, volumes, datas, atraso na compra de insumos, entre outros, geram incertezas nos resultados do processo.
- Dificuldade de planejamento e programação da produção: a carência de informações precisas, a dinâmica situação das ordens de pedido, as listas de materiais (*BOM*⁵) ora extensas e complexas, ora curtas e simples, a variedade de processos de produção e uma série de outros fatores, dificultam um ótimo planejamento e programação da produção, bem como, a estimação dos custos.
- Dinâmica situação de implementação do planejamento e controle da qualidade: devido à incerteza de um ótimo controle do processo para toda a variedade de produtos produzidos, executar as atividades de planejamento e controle de qualidade numa PPL torna-se complicado.

A PPL exige a mudança de paradigmas. As estratégias para a PPL são diferentes das aplicáveis à produção em massa. Por exemplo, os fabricantes de altos volumes ganham mercado baseado primeiramente no custo de seus produtos. Já os fabricantes em pequenos lotes ganham mercado primeiramente em quão rápido e apropriado eles poderão entregar o que seus clientes desejam. Similarmente, enquanto a estratégia de demanda de fluxo é muito importante para a produção em massa, ela não é apropriada para a PPL, pois é muito difícil balancear a capacidade produtiva quando os tempos de produção variam demasiadamente. Num ambiente de PPL, podem não existir dados suficientes para tornar o controle estatístico do processo praticável. Nesse caso, é necessário encontrar alternativas para o controle da qualidade, como por exemplo, a combinação de instruções de trabalho detalhadas e inspeções automáticas. Adicionalmente, técnicas de gerenciamento da qualidade, incluindo *design review*⁶, auditoria de processos, acompanhamento do produto em campo, ajudam a assegurar o sucesso da produção ^{[10],[25], [26]}.

1.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Um dos grandes desafios da PPL é sem dúvida atingir o nível de qualidade desejado durante a produção. A problemática da gestão da qualidade na PPL pode ser melhor

⁵ *BOM: Bill of Materials – Lista de materiais*

⁶ *Design review: técnica de gerenciamento usada para a avaliação de um projeto proposto, a fim de garantir que o projeto do sistema ou produto atende aos requisitos do cliente.*

compreendida a partir da denominada *trilogia de Juran*. Segundo Juran *et al.* [8], para se alcançar resultados satisfatórios, as organizações devem focar em três aspectos:

- Planejamento da qualidade: preparação para alcançar as metas da qualidade, assegurar que o processo é capaz de atingir as metas;
- Controle da qualidade: alcançar as metas durante as operações, garantir que as operações estão sendo conduzidas de acordo com o planejado;
- Melhoria da qualidade: rompimento da situação presente, atingir níveis superiores de desempenho.

Estes três processos estão interligados (Figura 1.3).

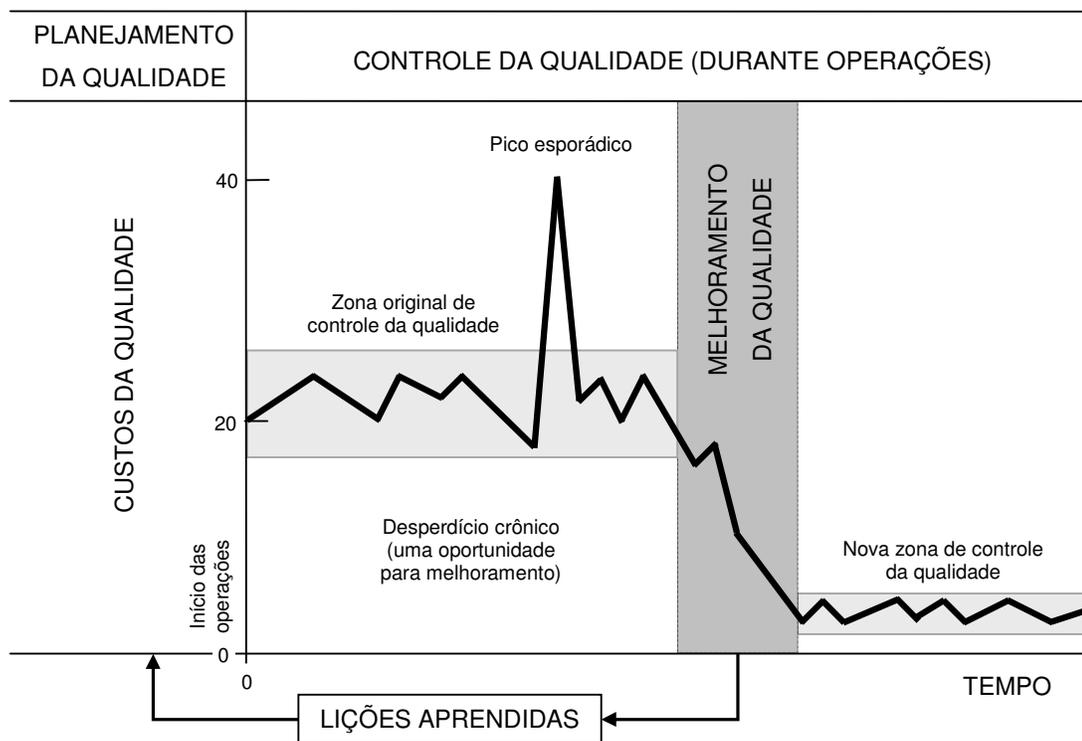


Figura 1.3 - Diagrama da trilogia de Juran [8]

A atividade inicial da trilogia de Juran é o planejamento da qualidade, tem como objetivo definir quem são os clientes e quais são suas necessidades. Os planejadores então desenvolvem o produto e projetam os processos para atender a estas necessidades.

Quando termina a fase do planejamento, os planejadores entregam as operações às forças produtivas. As operações se iniciam e geralmente os processos produtivos não são capazes de produzir com zero por cento de produtos defeituosos, em razão de deficiências de qualidade. Estas deficiências são denominadas de deficiências crônicas, pois atingem o produto desde o planejamento. As forças operacionais não conseguem eliminar as

deficiências crônicas, mas conseguem mantê-las em determinado nível de controle. Algumas vezes um evento especial ocorre e o mesmo deve ser eliminado para que o processo volte a operar nos níveis anteriores.

À medida que o trabalho vai-se desenvolvendo, as deficiências aparecem, normalmente apontadas pelo controle da qualidade. Através de um ciclo de melhoramento contínuo da qualidade, as deficiências vão sendo reduzidas ou eliminadas, estabelecendo-se assim, novos limites de controle da qualidade com níveis de defeitos cada vez menores ^[8].

Na PPL existem alguns fatores que são críticos no contexto dessa trilogia ^[18]:

- Com uma grande diversidade de produtos, torna-se lento e complexo o planejamento e a melhoria da qualidade para toda a gama de produtos;
- Quando o volume da produção é muito baixo ou unitário, a quantidade de amostras ou o tempo para coleta de dados, ajustes e observações durante a etapa de controle da qualidade pode não ser suficiente;
- A troca excessiva de lotes dificulta o controle da qualidade, uma vez que a capacidade do processo de fabricar um determinado produto pode variar significativamente a cada novo *setup*;
- Caso o produto seja produzido somente uma vez, a etapa de melhoramento da qualidade não pode ser executada para esse produto;
- Os produtos que levam um longo intervalo de tempo para repetir sua produção prejudicam a melhoria da qualidade, pois existe um grande distanciamento temporal entre as lições aprendidas, as ações de melhoria e a análise dos resultados.

Conseqüentemente, torna-se evidente a dificuldade com que as indústrias se deparam para atingir a qualidade desejada na PPL. Proliferam os planos de processo, enquanto complicam-se a programação e o carregamento das máquinas. Elevam-se os tempos de *setup*, as taxas de refugo e os custos para o efetivo controle da qualidade ^[27]. Em princípio, a ineficiência tende a aumentar, diminuindo a produtividade e, assim, elevando os custos de maneira geral. Evidentemente todos estes inconvenientes não existiriam ou, então, ocorreriam em menor escala para uma produção em massa. Assim, torna-se imperativo buscar novas soluções que forneçam à manufatura de pequenos lotes a eficiência necessária para manter-se no mercado com competitividade de custos e qualidade.

Uma filosofia que vem sendo utilizada, para contornar boa parte de todas essas dificuldades da garantia da qualidade na PPL, é o foco na capacidade do processo ^{[18], [28], [29]}. Na PPL, muitas vezes, é difícil de encontrar uma correlação direta entre um defeito encontrado num produto e as correções necessárias para o processo. Para vincular as correções do processo ao produto, deve-se avaliar a capacidade de cada um dos processos produtivos e então, equiparar os requisitos de um dado produto ao processo apropriado. E ainda, devem-se desenvolver perfis genéricos de processo que englobem suficientemente a maioria dos produtos a serem produzidos.

Em suma, embora a qualidade do produto e do processo esteja intrinsecamente relacionada, compreender a capacidade do processo⁷ e ter o domínio sobre o mesmo pode dar condições de prever se as especificações do produto serão atendidas. Adicionalmente, maiores esforços devem ser dispensados no planejamento do que no controle. O foco deve estar na prevenção de defeitos ao invés da detecção, a estratégia de controle consiste em monitorar mais o processo do que o produto.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma solução voltada especificamente para atender as dificuldades impostas pela PPL em relação à garantia da qualidade. É meta deste trabalho obter uma solução com as seguintes características:

- Foco na melhoria da capacidade dos processos;
- Ênfase na prevenção de defeitos;
- Flexível, aplicável a diferentes tipos de processos produtivos;
- Íntegra, que englobe diversos setores da empresa;
- Dinâmica, realimentada e expandida a partir dos dados históricos;
- Interativa, capaz de interagir com os funcionários do chão de fábrica e do planejamento da qualidade a partir de bases de conhecimento;
- Fácil uso, acessível a todos os níveis de funcionários de uma empresa;
- Provedora de informações a respeito dos produtos e processos que agreguem valor as fases de planejamento, controle e melhoria da qualidade.

⁷ *Capacidade do processo – determina a extensão da variação aleatória a que um determinado processo está sujeito sob certas condições* ^[8]

Desta forma, a abordagem desse trabalho segue na busca de soluções para preencher a lacuna existente nas práticas industriais. Para isso, o trabalho baseia-se fortemente nos seguintes conceitos:

- ferramentas e métodos da qualidade;
- similaridade de produtos;
- rastreabilidade e reaproveitamento das informações;
- flexibilidade e integração da produção;
- ferramentas computacionais;
- Sistemas Especialistas.

1.5 A TESE

A PPL lida constantemente com produtos diversificados, por conseguinte, tornam-se necessárias freqüentes tomadas de decisões, as quais são importantes não apenas para adaptar a inspeção de produto ou processo, mas também para atingir uma avaliação mais robusta do nível de qualidade e para conseguir melhorá-lo. Sabendo-se dessas necessidades, pretende-se demonstrar que aplicando um sistema computacional de processamento de informações que integra métodos de engenharia da qualidade, base de conhecimento sobre o produto e o processo e recursos de Inteligência Artificial, é possível superar as principais dificuldades da PPL referentes à garantia da qualidade.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Os capítulos que se seguem estão estruturados da seguinte forma:

No capítulo 2 são abordados os principais conceitos e métodos da garantia da qualidade nas etapas de planejamento, execução e controle da inspeção. Em seguida são exploradas as dificuldades no gerenciamento da qualidade num ambiente de PPL, uma vez que este será o enfoque desse trabalho. Por fim, são apresentados os principais movimentos de apoio à PPL.

O capítulo 3 descreve a solução proposta pelo autor para assistir a garantia da qualidade num ambiente na PPL. Nesse capítulo é descrito de forma detalhada todo o modelo conceitual que compõe esta solução.

No capítulo 4 é descrita uma aplicação do modelo conceitual desenvolvido para os processos de montagem de placas eletrônicas. São apresentados neste capítulo detalhes do desenvolvimento do sistema (aplicativo) para este setor industrial.

No capítulo 5 é discutido um estudo de caso de implantação do sistema em uma empresa montadora de placas eletrônicas que preconiza a PPL. Os principais resultados obtidos após a implantação do sistema na empresa também serão abordados neste capítulo.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para estudos futuros.

2 ASPECTOS RELEVANTES À GARANTIA DA QUALIDADE PARA A PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES

A inspeção pode ser definida como o processo de medir, analisar, ensaiar ou comparar de qualquer forma uma unidade de produto com os requisitos aplicáveis ^[30]. Segundo Pfeifer ^[31], as atividades relacionadas à inspeção da qualidade podem ser divididas em cinco grupos, que compreendem:

- o planejamento da inspeção: onde são definidas as características a inspecionar e gerados os planos de inspeção;
- a administração da inspeção: onde são formalizadas e encaminhadas as ordens de inspeção;
- a execução da inspeção: onde são realizadas as inspeções, coletados e armazenados os dados das medições;
- a avaliação dos resultados: onde os dados são filtrados, processados e os resultados avaliados;
- o controle da inspeção: onde os resultados são encaminhados aos respectivos receptores para ações de continuidade (ações corretivas, registros, comprovações junto a clientes) e/ou arquivamento.

Tradicionalmente se relaciona o conceito de inspeção com os métodos de controle para assegurar a perfeita qualidade do produto durante ou imediatamente após a produção. Esta concepção de inspeção orientada ao produto está sendo ampliada nos últimos anos. Atualmente, as inspeções não estão voltadas somente aos produtos, mas também às máquinas e equipamentos. A meta é perceber os desvios de qualidade no produto o mais cedo possível e intervir no processo produtivo com ações corretivas (Figura 2.1).

Assim, por exemplo, os resultados obtidos na inspeção podem ser usados para reajustar os equipamentos de fabricação e introduzir correções em seus parâmetros. Além disso, podem ser empregados para adaptar melhor as especificações de projeto e as capacidades de fabricação. Finalmente, é viável utilizar os dados de inspeção para avaliar os sistemas de medição, a fim de produzir dados confiáveis ^[32].

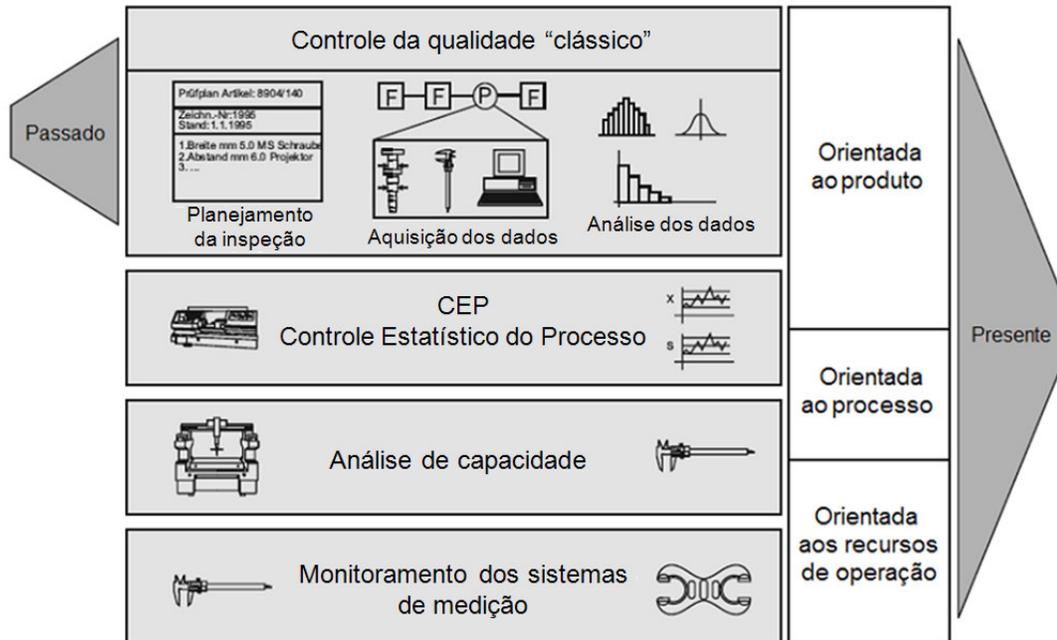


Figura 2.1 - Passado e presente do ciclo da qualidade pela inspeção ^[32]

2.1 CICLOS DE CONTROLE DA QUALIDADE

Os ciclos de controle da qualidade são a base para tomar decisões em muitos níveis da empresa e introduzir ações preventivas e corretivas da qualidade sobre produtos e processos. Somente a integração dos métodos de engenharia da qualidade em ciclos de controle da qualidade possibilita uma reação eficiente e rápida na presença de desvios e falhas ^[31].

O planejamento da qualidade fornece métodos técnicos e organizacionais para efetuar a inspeção da qualidade que, junto com a subsequente avaliação dos resultados, é a fonte de informação que completa o ciclo de controle da qualidade. Os resultados da análise em curto prazo dos dados de inspeção são utilizados para avaliar o nível de qualidade atual, enquanto que a análise em longo prazo ajuda a fechar os ciclos da qualidade adicionais.

A Figura 2.2 mostra um exemplo de como os ciclos da qualidade ajudam a melhorar a produção. Uma parte dos resultados da inspeção em curto prazo permite indicar ações corretivas sobre os programas das máquinas-ferramentas. Pela outra parte, os dados em longo prazo geram a base de dados da qualidade, empregada na melhoria do planejamento das inspeções futura (por exemplo, certas características serão inspecionadas em menor ou maior intensidade, segundo sua criticidade), também servem para melhorar o projeto posterior ^[31].

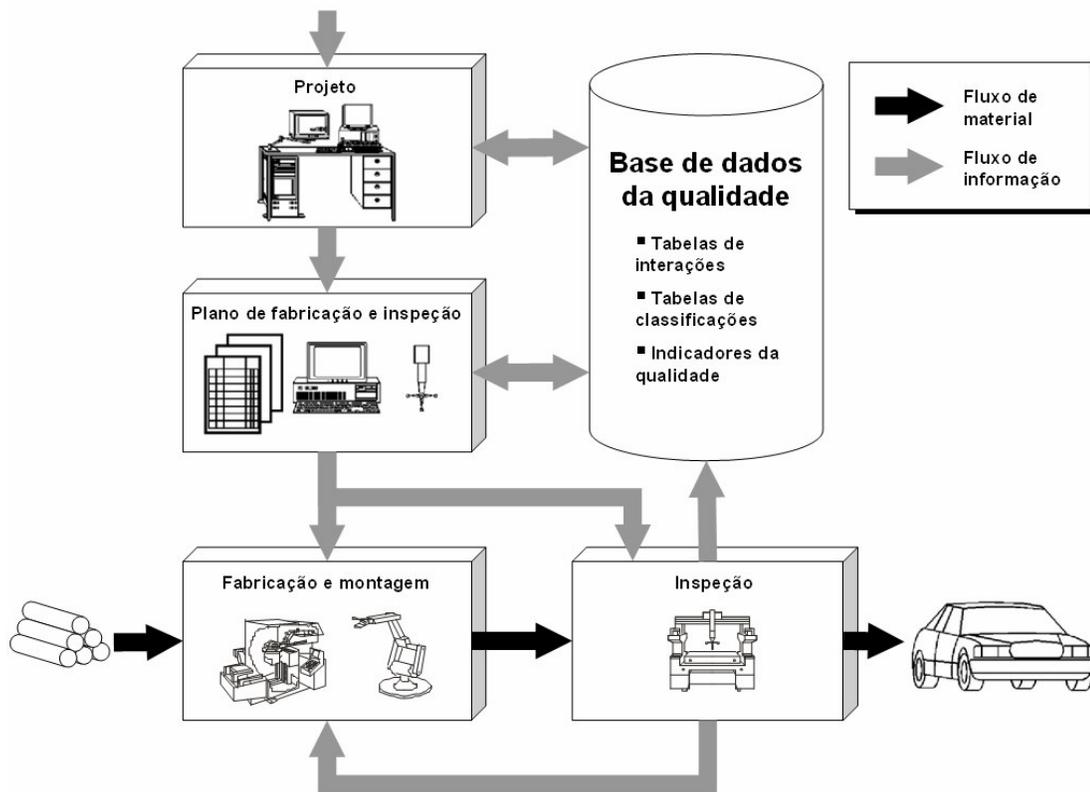


Figura 2.2 - Exemplo de um ciclo de controle da qualidade na inspeção ^[31]

2.2 PLANEJAMENTO DA INSPEÇÃO

O planejamento da inspeção tem por objetivo assegurar que o processo de inspeção esteja sistematizado a ponto de poder prover informações confiáveis referentes ao atendimento dos requisitos da qualidade do produto e do processo. O planejamento da inspeção não pode ser visto separadamente das outras áreas do processo produtivo. Ele está embutido no conceito total e deve ser elaborado ao mesmo tempo que as instruções de trabalho ^[32].

O planejamento da inspeção visa garantir primordialmente que a inspeção seja realizada de forma suficientemente segura e econômica. Em termos gerais, o planejamento da inspeção inclui um entendimento de ^{[32], [33]}:

- O que inspecionar, p. ex., quais características do produto serão escolhidos;
- Quando inspecionar, p. ex., em qual momento durante a produção;
- Como inspecionar, p. ex., medição ou comparação com um gabarito;
- Quanto inspecionar, p. ex., inspeção 100% ou por amostragem;

- Onde inspecionar, p. ex., na linha de produção ou na sala de medição;
- Como analisar os dados de inspeção, p. ex., controle estatístico do processo.

O planejamento da inspeção tem como principal resultado o plano de inspeção, também chamado de plano de controle, que define o que deve ser inspecionado, bem como todas as decisões para sua operacionalização.

2.2.1 Plano de controle da qualidade

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 do 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^{[33], [34]}.

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 qualidade⁸ e a gestão da qualidade na linha de fabricação⁹. Habitualmente se pratica focar o plano de controle nas características 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. A ISO/TS 16949:2002^[35] especifica que a organização deve assegurar que sejam implantados planos de controle para o produto fornecido.

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 fundamentais para o sucesso técnico e econômico de um plano de controle da qualidade^{[33], [34]}:

⁸ São os esforços aplicados à qualidade antes da fabricação do produto, o que inclui qualquer atividade de projeto e desenvolvimento.

⁹ É o controle de qualidade exercido durante a produção ou manufatura do produto.

- seleção adequada dos pontos de controle – de preferência 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.

Tipicamente, a elaboração do plano de controle envolve a análise dos modos de falhas de projeto e seus efeitos (DFMEA), o fluxograma do processo e a análise dos modos de falhas de processo e seus efeitos (PFMEA) ^[33]. Na literatura podem ser encontradas informações mais detalhadas sobre o DFMEA e PFMEA ^{[36], [37]}. Para fins deste trabalho é importante salientar a forte dependência que existe entre o PFMEA e o desempenho dos processos aos quais se refere. Um PFMEA bem executado terá um efeito benéfico na redução da taxa de falhas e não conformidades. Porém, os resultados do PFMEA não serão confiáveis a menos que se disponha de informação objetiva sobre o desempenho do processo. No caso de processos novos, em implantação, a ocorrência e a detecção deverão ser obtidas por analogia, a partir da informação sobre desempenho de processos que possam ser considerados similares. Para processos em andamento, a informação sobre desempenho, obtida numa base contínua, permite avaliar o impacto das melhorias incrementais na redução do nível de prioridade de risco.

2.3 EXECUÇÃO DA INSPEÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

A execução da inspeção geralmente é diferente para cada situação e, entre outras coisas, depende dos requisitos para satisfazer o cliente. As três principais instâncias onde deve ocorrer a inspeção são ^{[33], [38]}:

- Inspeção de recebimento – é a avaliação dos atributos de qualidade dos materiais de fornecedores internos ou externos. Os materiais podem ser matérias-primas, bens parcialmente acabados, componentes ou equipamentos. A inspeção de recebimento geralmente é realizada em áreas dedicadas próximas ao recebimento. Com este tipo de inspeção é possível avaliar os fornecedores e conhecer se o problema está nos materiais de entrada ou no processo. Destaca-se que nos últimos anos, devido ao cenário competitivo, houve revoluções no relacionamento fornecedor-cliente, onde se procuram desenvolver um clima de

confiança mútua, para que ambas as partes saiam ganhando. Quando esta relação de parceria atinge um elevado grau de evolução, passa-se a ter um fornecimento com qualidade assegurada, e a inspeção de recebimento é eliminada.

- Inspeção em processo – Devido à inter-relação entre as variáveis de produto e processo, a inspeção em processo envolve observação das variáveis de processo e/ou ambiente, bem como a inspeção do produto. A inspeção em processo serve para prover dados para tomadas de decisões sobre o produto e o processo, por exemplo: constatar se o produto está conforme as especificações, conhecer quando é preciso ajustar as variáveis do processo, avaliar se processo deve parar ou continuar, etc.
- Inspeção final e teste – é a avaliação do desempenho, aparência, confiabilidade ou usabilidade do produto como um todo. A inspeção final é executada para verificar se os requisitos do cliente foram atingidos. Requisitos apontados fora das especificações são verificados. Também é examinado se todas as operações foram completadas satisfatoriamente.

A inspeção pode ser classificada em inspeção por atributos ou atributiva e inspeção por variáveis. A primeira delas opera na detecção de eventos contáveis, isto é, a presença ou não de certo atributo do produto, geralmente uma falha ou defeito. Na maioria das vezes, a inspeção atributiva é baseada na comparação direta de certas características do produto com padrões físicos, por exemplo, na inspeção com calibradores P-NP (passa/não-passa). Esse tipo de inspeção já foi o alicerce do controle da qualidade no início da manufatura industrializada, mas apresenta fortes limitações na hora de aplicar técnicas de controle de processos.

A inspeção por variáveis é baseada em dados obtidos por medição e a comparação com os limites de especificação se realiza de forma numérica. Pode ser aplicada às características da qualidade de produto, mas também aos parâmetros de controle dos processos de fabricação. Este tipo de inspeção é a que melhor se adapta às necessidades do controle de processos, permitindo alcançar o ideal de operar “no alvo com variação mínima”¹⁰.

¹⁰ Afirmação atribuída ao Prof. G. Taguchi e que diz respeito à definição de “qualidade classe mundial” [39].

2.3.1 Análise dos dados coletados pela inspeção

As informações provenientes da inspeção são utilizadas durante a produção através de diferentes métodos de controle, conforme mostrado na Figura 2.3 ^[31].

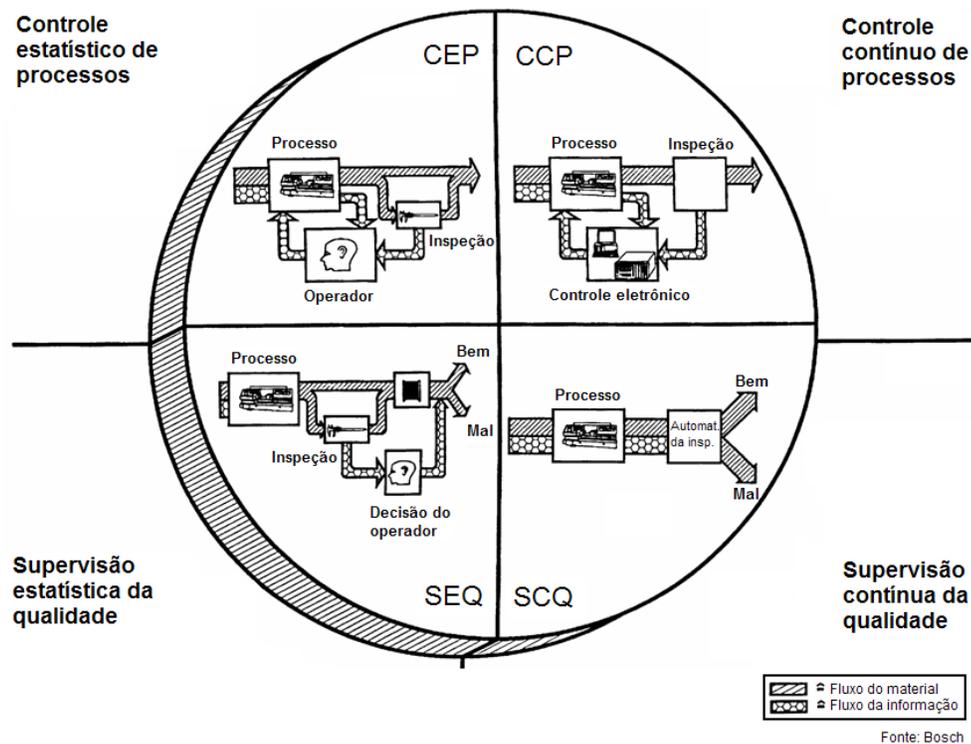


Figura 2.3 - Métodos para controle e supervisão do processo ^[31]

No CEP clássico, o operador extrai periodicamente amostras do produto e as avalia seqüencialmente. O acompanhamento por meio de gráficos de controle permite identificar quando o processo apresenta variações especiais, as quais precisam ser eliminadas para restabelecer o estado de controle ^[39]. As correções necessárias são realizadas pelo operador com base nos dados de inspeção, mas também usando informação e conhecimento sobre o processo em questão. O CEP pode ser realizado com dados de atributos ou de variáveis, obtidos por medição. Esta última modalidade atende melhor o requisito de manter os processos “no alvo com variância mínima”.

O CCP baseia-se na inspeção contínua de produto para realizar correções no processo que assegurem a conformidade com as especificações. É geralmente implantado usando sistemas automáticos de medição, que geram dados interpretados por algum tipo de controle eletrônico, para a inspeção da qualidade de produto.

A SCQ é implementada através da avaliação de conformidade de 100% dos itens produzidos. Com base nos resultados da mesma, decide-se pela aceitação ou rejeição de

cada item. Em geral, a SCQ é uma técnica custosa e demorada, mas pode ser uma solução adequada para processos que apresentam não conformidades freqüentes, especialmente quando se dispõe de sistemas automáticos de inspeção.

Para reduzir o volume de inspeções pode-se aplicar a SEQ, que baseia as decisões de aceitar ou rejeitar em lotes de produto nos resultados da inspeção de uma amostra, geralmente pequena. Por se tratar de uma técnica estatística, existe certo risco de que os lotes aprovados não possuam a qualidade requerida, ou mesmo que lotes rejeitados não tenham tantos defeitos para justificar tal decisão. Por esta razão, a SEQ é usada somente quando não é possível aplicar as outras técnicas, particularmente quando se desconhece o processo do fornecedor ou não se tem controle sobre ele.

Desta forma, tanto o CEP como o CCP, procuram atuar nos parâmetros de processo para evitar a produção de itens não conformes. Por outro lado, a SEQ e a SCQ focam na identificação e segregação de produtos não conformes, adotando uma atitude passiva quanto ao controle do processo. Assim, estas técnicas previnem diretamente a produção de itens não conformes e também, evitam que estes cheguem ao cliente.

2.3.2 Confiabilidade da inspeção

Diversos fatores afetam a confiabilidade dos métodos de controle de produto e processo apresentados no item anterior, resultando em ações desnecessárias ou até mesmo incorretas. Estes fatores têm impactos diferentes, dependendo se a inspeção é atributiva ou por variáveis, por amostragem ou 100%, manual ou automática.

Como já fora introduzido na apresentação da SEQ, as decisões tomadas a partir da inspeção de amostras utilizam métodos estatísticos e, conseqüentemente, estão sujeitas a dois tipos de erros ^[33]:

- Tipo I (Falso positivo): ocorre quando a inspeção decide que uma característica é aceitável, mas na verdade ela não está adequada.
- Tipo II (Falso negativo): ocorre quando a inspeção conclui que a característica não é aceitável, mas na verdade ela está adequada;

Em geral, amostras maiores produzem resultados mais confiáveis, assim, o ideal seria tomar grandes amostras freqüentemente para se ter uma boa capacidade de detectar pequenas mudanças no produto ou processo. Entretanto, isto é prática e economicamente inviável, principalmente quando a avaliação de uma característica da qualidade implica em um ensaio destrutivo do produto. A saída é escolher entre pequenas amostras a curtos intervalos de tempo ou grandes amostras a intervalos de tempo maiores. Desta forma,

procura-se chegar a um equilíbrio entre a precisão e custo acarretado para tanto. Deve-se, também, considerar, na definição da frequência de amostragem, a chance de detectar aqueles fatores que podem introduzir uma causa especial no processo, como por exemplo: a troca de operador, a troca de lote, troca de matéria-prima, etc. ^[39].

Inspeções feitas por pessoas (p. ex. visuais ou manuais, com ou sem apoio instrumental) são menos confiáveis que as inspeções automáticas, uma vez que são afetadas pelo tédio e cansaço da pessoa, dando origem aos denominados “erros grosseiros”. Inspeções visuais atributivas são particularmente problemáticas, devido à dificuldade adicional de estabelecer objetivos de conformidade e não conformidade ^[40].

A inspeção por variáveis desponta como a mais interessante para implementar controles efetivos e eficientes de produto e processo. Dados obtidos por medição têm maior conteúdo de informação do que os dados atributivos, pois evidenciam a importância do afastamento em relação à qualidade ideal, mesmo quando o item inspecionado seja conforme.

No entanto, ainda que realizada de forma automática e na totalidade do produto, a inspeção por variáveis não é capaz de assegurar, de forma robusta, a qualidade do produto aceito ^[41]. As propriedades metrológicas dos sistemas de medição e as influências ambientais sobre os objetos sob inspeção são os principais responsáveis pela aceitação de itens não conformes e a rejeição de itens conformes.

2.3.3 Aspectos metrológicos

Observa-se que a medição torna-se imprescindível para o cumprimento dos objetivos da empresa no que diz respeito à qualidade. No entanto, ela também é um processo e, como tal, apresenta variação. Essa variação pode ser caracterizada a partir do desvio existente entre o resultado da medição e o valor verdadeiro da característica sob análise (valor do mensurando), denominada de erro de medição. Assim, os dados usados na garantia da qualidade de produto e processo não descrevem a qualidade produzida, mas fornecem uma imagem distorcida da mesma (Figura 2.4). Para que esse erro não afete as decisões a serem tomadas no controle de produto e processo, o mesmo deve mostrar-se pequeno frente à variação total presente nos dados e frente à tolerância do produto ^[42].

As causas dos erros de medição podem estar relacionadas com fatores ambientais que influenciam o processo de medição (p. ex: ruído, temperatura e vibração), falta de um sistema de medição adequado para avaliar determinada característica, erros grosseiros causados por operadores durante uma medição, falta de procedimentos adequados ou padrões incorretos de comparação ^[43].

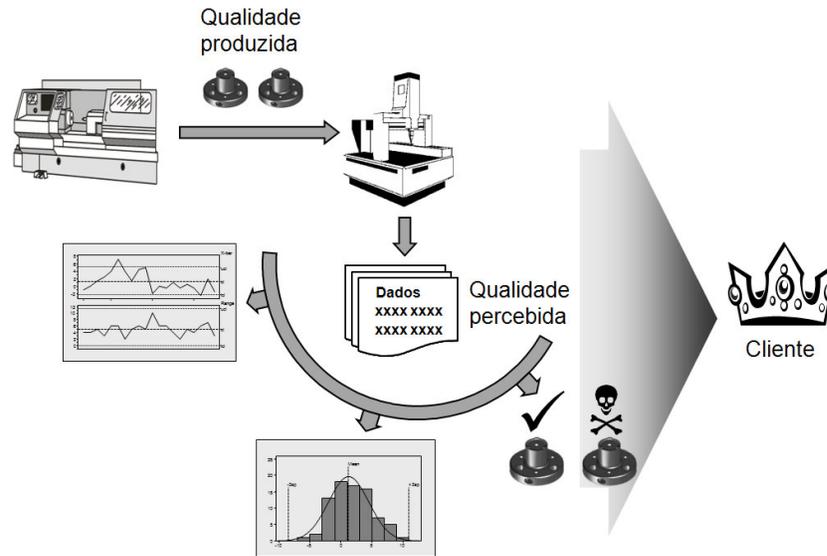


Figura 2.4 - Transformação dos dados brutos em informação para tomada de decisão ^[42]

Quanto maior for o erro de medição com relação à variação do processo, menor será a efetividade das ações tomadas a partir dos dados. Esse efeito é diferente dependendo da técnica usada para pós-processamento dos dados brutos. No caso da inspeção seletiva, pode-se esperar a aceitação de produto não conforme e a rejeição de produto conforme ^[44]. Foi verificado na inspeção 100% que o efeito da tendência na probabilidade de aceitar produto não conforme é significativamente maior que o efeito da repetitividade ^[41]. No CEP, o erro de medição afeta a distância e posicionamento dos limites de controle, reduzindo a capacidade dos gráficos de controle para detectar mudanças no processo e alterando a probabilidade de alarmes falsos ^[45]. A avaliação de capacidade dos processos também é afetada pela medição, através da mudança no valor estimado dos índices de capacidade ^[46].

Por essa razão, a garantia da qualidade das medições deve dar suporte à garantia da qualidade de produto e processo de produção, visando evitar variações excessivas ou não controladas dos processos de medição que possam distorcer os dados de forma significativa. Isso é reconhecido pelas normas ISO 9001:2000 ^[47] e ISO/TS 16949:2002 ^[35]. Estudos que analisam a variação existente nos resultados de medição estão descritos em várias literaturas específicas, sendo a mais difundida o manual de referência de Análise dos Sistemas de Medição (MSA) ^[48], de uso recomendado na cadeia de fornecimento da indústria automotiva, mas adotado por empresas de diversos ramos.

2.4 DIFICULDADES DE GERENCIAR A QUALIDADE NUM AMBIENTE DE PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES

Na PPL, para se produzir de forma rentável, é fundamental que o planejamento da inspeção seja executado adequadamente, uma vez que a etapa de produção é muito curta^[18]. Entretanto, a grande diversidade e o lançamento contínuo de novos produtos num ambiente de PPL trazem diversos problemas para o planejamento da inspeção.

Para cada um desses produtos é preciso descobrir: o que é novo; como isso afeta o controle, a inspeção, os requisitos de qualidade, etc.; e o que necessita ser feito para assegurar que a “novidade” esteja corretamente identificada e controlada. Cada produto requer suas próprias especificações de fluxo de produção, pontos de inspeção, métodos de controle, requisitos de qualidade e assim por diante. Desse modo, a PPL requer uma constante criação e atualização dos planos de controle.

A grande diversidade de produtos cria também um considerável problema de comunicação sobre qual é a ação a ser tomada para cada produto. A quantidade de tal comunicação pode tomar enormes proporções, devido ao efeito multiplicativo do número de produtos, número de processos, número de ferramentas, entre outros. A consequência desse grande volume de comunicação é que o problema da qualidade da comunicação seja tão importante como a qualidade do produto e processo. Assim, para executar o planejamento da inspeção na PPL é essencial que exista um eficiente gerenciamento das informações da qualidade, incluindo dados de inspeções, tipos de controle, ferramentas, fluxos de produção, especificações do produto, etc., entre todos os envolvidos^[8].

Outra dificuldade do planejamento de inspeção na PPL é atingir a abrangência adequada, ou seja, planejar corretamente as inspeções que serão utilizadas na produção, evitando excessos ou faltas. O volume de detalhes e a falta de informações adequadas de alguns aspectos, como por exemplo, a taxa de ocorrência esperada para um determinado defeito e o conhecimento da configuração ótima para as variáveis do processo, tornam impossível ou economicamente inviável verificar todos os detalhes que tangem o planejamento. Para lotes de produção com baixa taxa de repetições torna-se mais crítico, pois pode não existir chance de replanejamento^{[8], [10]}.

Além disso, o planejamento da inspeção enfrenta problemas que são do cotidiano da maioria das empresas, mas num ambiente de PPL eles se tornam ainda mais graves, como por exemplo: o restrito tempo para se realizar o planejamento da qualidade; as constantes mudanças nas especificações do produto; a falta de informações sobre o produto, sobretudo devido à questão da terceirização; o grande número de clientes e fornecedores envolvidos, entre outros^[49].

A atividade de execução da inspeção também é bastante crítica na PPL, os parâmetros de referência para a tomada de decisões nem sempre existem. A natureza da PPL faz com que o *setup* seja um fator predominante na maioria das características de qualidade do produto. A principal razão para esse fato é devido ao tempo de produção do lote geralmente ser tão curto que a variação do processo torna-se mínima. Conseqüentemente, se o *setup* estiver incorreto, provavelmente todo o lote sairá com problemas.

O *setup* consiste na montagem e no ajuste de máquinas, ferramentas, instrumentos e materiais apropriados para que o produto resultante esteja conforme as especificações. O problema está em encontrar a seqüência de ajustes durante o *setup* que irá gerar um resultado ótimo. Em alguns processos não é evidente conhecer onde está o alvo do processo, saber se o *setup* atual está realmente centralizado ou ajustar o *setup* com precisão para atingir o resultado desejado. Além disso, é pouco provável dispor de tempo ou produtos suficientes para efetuar o ajuste do *setup*. Devido à importância e dificuldade do *setup* na PPL, muitas empresas priorizam a inspeção no *setup*, onde mais de um inspetor confere o mesmo produto antes de liberar a produção do lote, sendo que em certos casos a execução do *setup* necessita ser feita por um especialista ao invés do próprio operador ^{[8],[50]}.

Valem ressaltar também os fatores que afetam a confiabilidade das inspeções como: sistemas de medições não capazes ou não calibrados, padrões de referência não rastreáveis, operadores despreparados para executar a inspeção, freqüência de amostragem e tamanho da amostra incorretos, entre outros, que obviamente na produção em massa também existem, mas podem se tornar decisivos especialmente na PPL. Uma vez que inspeções incorretas podem gerar conclusões erradas sobre produto e como na PPL o tempo de produção é escasso, esses erros podem não ser corrigidos durante a produção, perdendo-se a produção de todo o lote, ou em casos extremos, serem percebidos somente quando o produto já foi entregue ao cliente.

Finalmente, destaca-se que as atividades de avaliação e controle dos dados de inspeção também são muito complexas de serem realizadas na PPL. Num ambiente de PPL existe uma introdução contínua de novos produtos, gerando uma constante indefinição para saber se o processo está ou não sob controle. Quando um novo produto entra em produção não existe um parâmetro ou limites de controle que sinalize o estado do processo. Dessa forma, torna-se muito complicado tomar decisões como: Intervir ou não intervir no processo? Parar ou continuar a produção do lote? ^[50]

Outro fator crítico na PPL é a execução da realimentação dos dados e as ações corretivas. O grande número de detalhes que envolvem o processo torna muito provável a

presença de erros durante a produção. Para corrigir esses erros, é essencial usar a informação obtida através da inspeção para o melhoramento da qualidade. Devido à grande quantidade e rotatividade de produtos, encontrar erros durante o processo, corrigi-los e prevenir para que eles não mais aconteçam torna-se uma tarefa muito difícil. Em muitos casos o tempo de produção não é longo o suficiente para dar um sinal para a realimentação, diagnosticar a causa e implementar a ação corretiva. E ainda, quando a produção de um determinado lote não acontece freqüentemente, o conhecimento gerado com a realimentação das informações poderá ser perdido e erros que já foram diagnosticados voltarão a acontecer ^[8].

2.5 PRINCIPAIS AÇÕES DE APOIO À PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES

Os principais avanços para a PPL tiveram início na década de 1970, no Japão, mais especificamente na Toyota, com uma nova abordagem que passou a ser conhecida como produção enxuta ^[11]. A produção enxuta introduziu importantes conceitos para a PPL, entre os quais se destacam: engenharia simultânea; tecnologia de grupo (GT); troca rápida de ferramentas (SMED); modularidade; células de produção; desdobramento da função qualidade (QFD). Atualmente, o sistema de produção enxuto ainda encontra-se em processo de difusão nos mais diversos segmentos industriais, não se restringindo ao setor automotivo ou as grandes empresas. Existe uma vasta bibliografia a respeito do sistema de produção enxuta. Contudo, não existe uma metodologia para sua implantação que possa ser apontada como mais recomendável ou mais efetiva ^[51].

A busca de um melhor aproveitamento e racionalização da PPL tem motivado os pesquisadores a desenvolver novas técnicas gerenciais e de produção. Nota-se que os caminhos para se atingir eficiência na PPL passam cada vez mais por uma crescente flexibilidade dos sistemas de manufatura, não apenas de equipamentos, mas também na tomada de decisões de projeto, planejamento, agendamento, manuseio de materiais e gerenciamento das informações ^[52]. Neste contexto, uma composição de experiências, valores, informações e idéias vêm sendo estudadas nas academias e aplicadas nas rotinas, processos e práticas das organizações.

Um campo bastante explorado pelos pesquisadores diz respeito à otimização da programação da PPL. Existe uma grande quantidade de estudos e muitas propostas metodológicas para abordar o problema, como por exemplo, algoritmos genéticos, programações lineares, regras heurísticas e outras. Os trabalhos nessa área buscam soluções alternativas para se obter uma alocação eficiente dos recursos de fabricação num ambiente de PPL ^{[53], [54], [55]}.

No âmbito do controle do processo, vêm sendo desenvolvidos e estudados diferentes tipos de gráficos de controles para serem aplicados no controle estatístico do processo (CEP) num ambiente de PPL. Estes gráficos, conhecidos como gráficos de controle de corridas curtas, permitem determinar limites de controle significativos para o processo, mesmo quando é coletado um número limitado de pontos. Foi desenvolvida uma série de gráficos de controle de corrida curta, entre eles podemos citar: Gráfico Q, Gráfico EWMA dinâmico, gráfico CUSUM auto-iniciado, entre outros ^{[56], [57]}. Contudo, pouco tem sido feito em termos de desenvolver metodologias para comparar e selecionar as diferentes alternativas de gráficos. Isto tem sido uma das principais razões da limitada aplicação desses gráficos na prática ^{[21], [22]}.

Focando exclusivamente no tema da sistematização e racionalização da garantia da qualidade na PPL, foram encontradas poucas referências que abordam o problema. Cheng ^[58] propõe uma metodologia que utiliza análise de variância, conceitos de tecnologia de grupo e famílias de peças para implantação do CEP num ambiente de PPL. Em sua metodologia Cheng propõe ainda um Sistema Especialista para reconhecer pontos fora de controle e sugerir as diretrizes de ajuste. O trabalho mostrou que a integração do CEP com os conceitos de tecnologia de grupo e o uso de Sistemas Especialistas é uma proposta eficiente para o controle da qualidade na PPL.

Al-Salti e Stathan ^[29] desenvolveram uma metodologia utilizando o conceito de tecnologia de grupo e dados históricos, obtidos de famílias de itens, para estimar os limites do gráfico de controle num ambiente de PPL. A metodologia foi aplicada na produção de pistões em pequenos lotes. Com a avaliação dos resultados obtidos pode-se comprovar que através do uso de dados históricos de componentes similares e da tecnologia de grupo é possível estimar de forma precisa os parâmetros do processo para a produção de um novo produto.

Howell e Young ^[59] utilizaram a correlação visual para determinar as características a serem inspecionadas em objetos sólidos numa PPL. A estratégia foi composta de duas partes: identificação do objeto e localização da característica de inspeção. Através da avaliação da estratégia de inspeção em objetos cúbicos pode-se verificar que a correlação visual é um método promissor de ser aplicado na PPL, mas ainda era necessário avaliar de forma mais intensiva a robustez desse método.

Pfeifer e Merget ^[60] criaram uma metodologia para o desenvolvimento de uma ferramenta de software para a fase de projeto do produto. A ferramenta teve como objetivo identificar interdependência entre o produto e os parâmetros de inspeção e teve como elemento principal duas matrizes que relacionavam esta interdependência. Eles visaram sua

aplicação para a PPL. A partir de uma aplicação prática, pode-se constatar através da interação do software com a base de dados contendo informações de inspeção que foi possível melhorar potencialmente a habilidade na tarefa de inspeção de novos produtos.

Davé *et al.* ^[61] utilizaram redes neurais para monitorar e controlar em tempo real a qualidade do processo. Eles aplicaram este conceito para resolver o problema na soldagem de peças fabricadas em pequenos lotes. O objetivo principal da rede neural foi identificar as falhas no processo. Os resultados obtidos mostraram que as redes neurais aumentaram a habilidade da empresa em caracterizar e controlar os processos de PPL.

Zhu ^[62] apresenta um modelo de sistema de planejamento do CEP para pequenos lotes assistido por computador. Neste modelo são utilizadas técnicas de tecnologia de grupo e informações do arquivo do projeto (CAD) para identificar as características críticas a serem medidas numa determinada peça. O trabalho demonstra que a formação de famílias é um importante artifício para se conseguir uma aplicação bem sucedida de CEP num ambiente de PPL.

Lian, Colosimo e del Castillo ^[63] utilizaram a técnica de Monte Carlo Seqüencial (SMC) para resolver o problema de ajuste de *setup* de máquina quando os parâmetros são desconhecidos. Eles discutiram a aplicabilidade desta técnica na PPL. O resultado da técnica de SMC foi confrontado com outras duas técnicas distintas, regra de Grubbs e Markov chain Monte Carlo (MCMC), mostrando que a SMC foi a mais confiável.

Jiang *et al.* ^[64] propuseram um sistema de controle da qualidade dinâmico para a PPL, integrando teoria de similaridade, CEP e redes neurais. Os autores mostram que o controle da qualidade dinâmico é um eficiente caminho para controlar a qualidade na PPL.

Li e Wang ^[65] criaram o conceito de “flexibilidade de capacidade”. A partir deste conceito, desenvolveram o conteúdo de uma política de controle da qualidade para uma produção de pequenos lotes e analisam a proposta através da técnica de projeto de experimentos (DOE). O conceito criado pelos autores demonstra a relevância de um controle da qualidade dinâmico para a PPL.

Deste modo, a partir da bibliografia pesquisada sobre o tema da garantia da qualidade na PPL, verificou-se que as técnicas utilizadas pelos pesquisadores centram-se principalmente nas abordagens de: Similaridade de produtos (Tecnologia de grupo e organização em famílias), Inteligência Artificial (Sistemas Especialistas, Sistemas baseados em conhecimento e Redes Neurais), Métodos da Garantia da Qualidade (CEP e plano de inspeção) e Tecnologia de Informação (Recursos computacionais). Percebe-se que estas técnicas foram empregadas de forma isolada ou combinada, a fim de resolver problemas da qualidade na PPL, quase em sua totalidade pontuais, relacionados ao planejamento ou ao

controle da qualidade. Com isso, verificou-se a necessidade de construir um modelo que permitisse abranger uma amplitude mais ampla da garantia da qualidade, com foco na integração das etapas de planejamento, controle e melhoria, e voltado especificamente para atender as dificuldades impostas pela PPL.

A Tabela 2.1 ilustra os principais problemas que serão atacados neste trabalho e seu nível de impacto, pontuadas pelo autor deste trabalho, em relação às características pré-definidas no capítulo anterior para caracterizar a PPL. Nota-se que estes problemas também acontecem em outros sistemas de produção, porém, com um nível de impacto menor.

Tabela 2.1 - Foco de resolução dos problemas da tese

Tipo de produção							Impacto acumulado por tipo de produção	
Produção em massa	1	0	1	0	0	1		40
Produção em batelada	1	0	0	1	0	1		85
Produção em pequenos lotes	0	1	0	1	1	0		140

Problemas da qualidade		Características da produção		Volume de produção (total)		Tempo médio de produção por lote		Variedade de produtos		Impacto acumulado por etapa da qualidade	
		Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo		
Planejamento	Falta de informações adequadas para o planejamento	5	10	0	0	5	10	30	60		
	Dificuldade de gerenciar as informações	0	0	0	0	10	5	15			
	Tempo reduzido para planejamento da qualidade	0	0	0	0	10	5	15			
Controle	Informação / tempo insuficiente para <i>setup</i> do processo	0	5	5	10	10	0	30	70		
	Dificuldade no diagnóstico de falhas e NC (encontrar as causas)	0	10	0	10	0	0	20			
	Tempo reduzido para implementação de ações corretivas	0	10	0	10	0	0	20			
Melhoria	Dificuldade de conhecer e caracterizar o processo	0	10	0	10	0	5	25	50		
	Dificuldade de implementar as melhorias e medir seu impacto	0	10	0	10	0	5	25			

Impacto dos problemas da qualidade em relação às características da produção

0	5	10
Baixo	Médio	Alto

Portanto, no presente trabalho abordar-se-á o modelo conceitual, bem como o desenvolvimento e a implantação de um sistema para auxiliar nos problemas da qualidade mais comuns deparados na PPL. A estruturação desse sistema estará baseada nas mesmas técnicas utilizadas pelos pesquisadores, ou seja, Similaridade de produtos, Inteligência Artificial, Métodos de Garantia da Qualidade e Tecnologia da Informação, uma vez que estas vêm sendo aplicadas com sucesso e estão permitindo uma reorganização mais racional da garantia da qualidade num ambiente de PPL.

3 CONCEITO DE UM SISTEMA INTEGRADO PARA ASSISTIR À GARANTIA DA QUALIDADE NA PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES

Este capítulo descreve uma proposta para a concepção de um sistema integrado capaz de dar suporte a inspeção da qualidade num ambiente de PPL. Estruturada na forma de um modelo conceitual, a solução proposta integra métodos de engenharia da qualidade, base de dados da qualidade contendo informações sobre o produto e o processo e recursos de Inteligência Artificial (Figura 3.1).

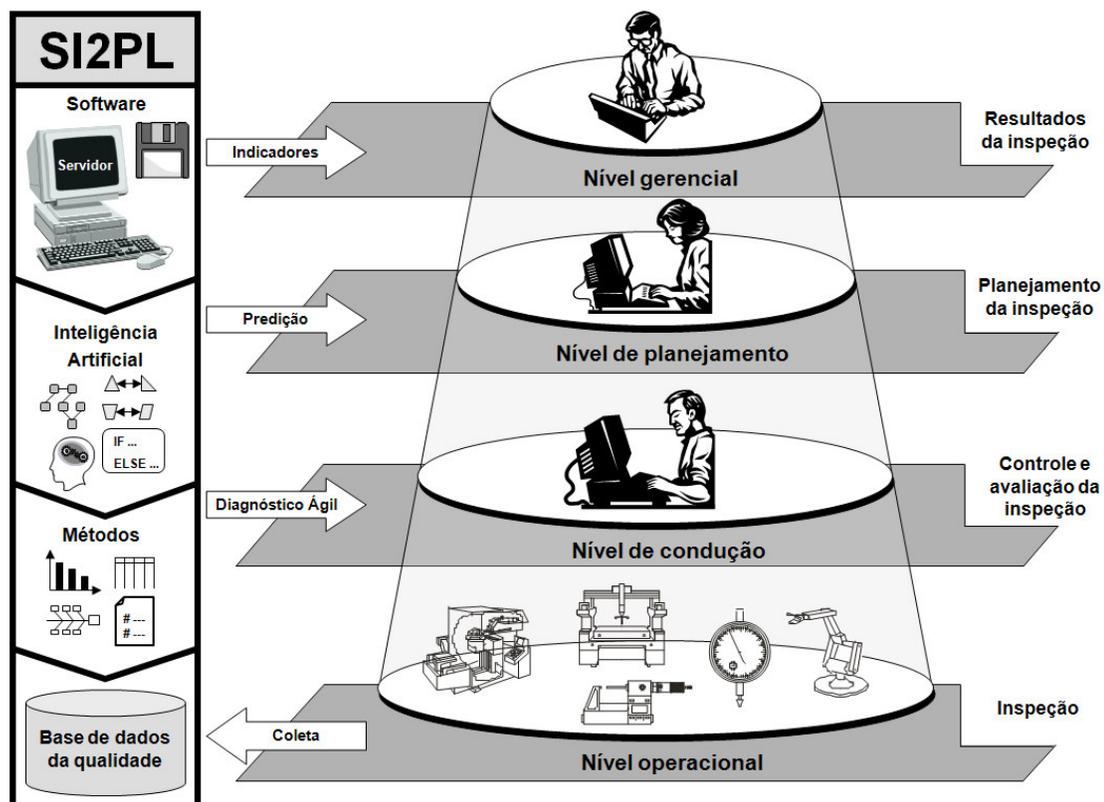


Figura 3.1 – Atuação do SI2PL num modelo organizacional de gestão da qualidade

A função desse modelo, nomeado de SI2PL (Sistema Integrado para Produção em Pequenos Lotes), é derivar uma ferramenta computacional capaz de armazenar e tornar

rapidamente acessíveis aos diferentes níveis organizacionais da empresa informações sobre a qualidade do produto e o desempenho dos processos. Adicionalmente, esta ferramenta agrega Sistemas Especialistas para interagir com o usuário durante o planejamento da inspeção e o controle dos processos.

O SI2PL atua em diferentes níveis organizacionais da empresa com objetivos específicos. No nível operacional são registrados os dados de inspeção para avaliação e atualização dos resultados. No nível de condução dos processos, a meta é gerar um diagnóstico rápido na presença de desvios detectados pela inspeção. Já no nível de planejamento, o objetivo é a predição da qualidade a partir do plano de controle criado. E finalmente, no nível gerencial são gerados indicadores demonstrando a qualidade atingida.

Um maior detalhamento do SI2PL é realizado a seguir. Primeiramente, apresenta-se uma visão geral, mostrando seus objetivos, abrangência, particularidades e pré-requisitos. Em seguida, é feita uma descrição detalhada de todo o modelo.

3.1 VISÃO GERAL DO SI2PL

Conforme definido no capítulo anterior (ver Tabela 2.1), o SI2PL busca atender as necessidades do planejamento da qualidade, controle da qualidade e sua melhoria contínua. Além disso, dentro de um ambiente de engenharia simultânea, a base de dados do SI2PL poderá ser usada pela equipe de desenvolvimento do produto e processo, com o intuito de conhecer os controles aplicados e os problemas mais freqüentes que acontecem durante a produção, aumentando assim, a interação entre as áreas e a robustez das informações. A Figura 3.2 apresenta a estrutura completa do SI2PL mostrando todos os módulos contidos e o fluxo da informação em relação às atividades do ciclo de vida do produto e entre cada módulo. Nota-se que as informações fluem de forma multilateral e são obtidas e geradas em instantes diferentes. O conteúdo destas informações e a operacionalização em detalhes de cada módulo serão descritas na próxima seção.

Na etapa de planejamento da qualidade, pretende-se assistir o planejamento da inspeção na definição dos controles das características críticas de produto e processo. Para isso, o SI2PL interage com o usuário (planejador) indicando um produto similar, a fim de que um plano de controle já registrado possa ser copiado, e em seguida, predizendo a qualidade do processo a partir dos controles estabelecidos. Assim, planos de controles consistentes que previnam os defeitos podem ser rapidamente criados e atualizados, o que representa o maior gargalo no planejamento da inspeção na PPL.

Durante a produção, o SI2PL permite o cadastro dos dados da inspeção do produto e controles do processo, além disso, provê um sistema de diagnóstico capaz de interagir

com o usuário (analista) para informar quais são as prováveis causas raiz dos defeitos. Desta forma, pretende-se criar uma base de dados de inspeção para a análise da qualidade atingida e para melhoria contínua dos planos de controle. Por sua vez, o sistema de diagnóstico do processo visa obter uma rápida compreensão e correção das causas dos problemas, a fim de que o processo seja corretamente configurado durante o *setup* e desvios sejam rapidamente corrigidos durante a produção.

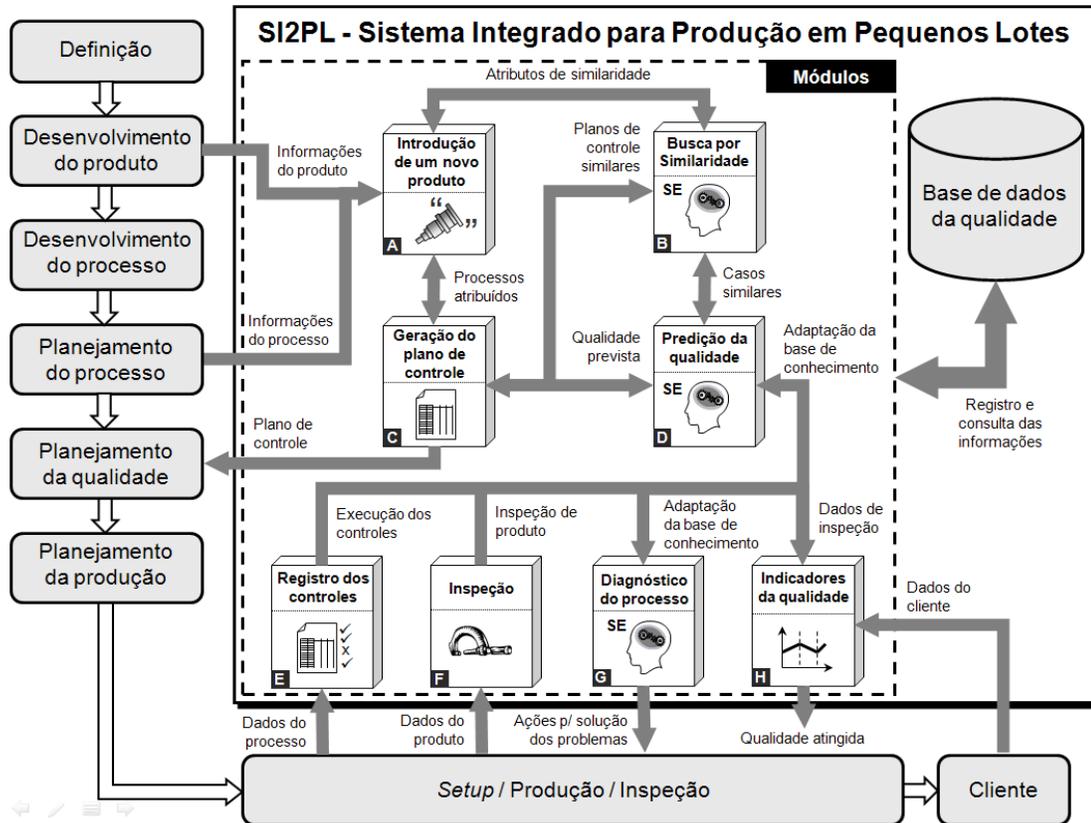


Figura 3.2 – Fluxo da informação do SI2PL no ciclo de vida do produto e internamente

O SI2PL suporta ainda um sistema de indicadores da qualidade, a fim de que a qualidade atingida durante a produção seja compreendida e analisada de forma dinâmica. Para tal, indicadores da qualidade são calculados em função da coleta dos dados de inspeção. Assim, o usuário (operador, analista planejador ou gerente) tem condições de tomar decisões sobre a qualidade dos produtos e processos. Também são considerados os indicadores da qualidade no cliente. O registro de todas as informações relacionadas a reclamações, análise de desempenho de falha e retorno de produtos é essencial para conseguir uma estratégia de gestão da qualidade bem sucedida.

3.1.1 Sistemas Especialistas no SI2PL

Quando se busca uma solução aceitável para os problemas relacionados à produção, o uso de métodos de tentativas e erro torna-se caro e ineficiente, devendo ser evitados. A PPL é um problema complexo, e um esforço para resolver esse problema usando diretamente uma solução analítica é impraticável. Um enfoque para a resolução dos problemas na PPL é estudar os dados históricos, que possuem certas características preferenciais em graus variados. Uma particular heurística, baseada na experiência histórica e no aprendizado, pode ser seguida para reduzir a procura por uma decisão aceitável. As heurísticas são regras que irão auxiliar na descoberta de uma ou mais soluções para um problema específico. Elas representam o conhecimento informal, ou atalhos que permitem rapidamente pesquisar a solução de um problema sem ter que realizar uma análise detalhada de uma situação particular, porque ou uma análise de um problema similar já foi realizada com êxito anteriormente ou uma lição foi aprendida de uma tentativa mal sucedida de um problema similar ^[10]. Assim, se faz necessária a utilização de uma metodologia especialmente voltada para a solução de problemas desta natureza.

Neste caso, a Inteligência Artificial se apresenta como uma alternativa bastante atrativa. Através da aplicação dos Sistemas Especialistas (SE's) tem-se a oportunidade de acumular conhecimento adquirido durante um longo período de trabalhos práticos e preservar essa experiência para aplicações futuras.

Um Sistema Especialista (SE) é constituído de um programa de computador que utiliza conhecimento armazenado em seu banco de dados, chamado de base de conhecimento, e técnicas de inferência, a fim de solucionar problemas não estruturados, cuja solução é difícil utilizar um procedimento lógico ^[67]. Os SE's são aplicados nas situações em que são requeridos raciocínios formais, como por exemplo: diagnóstico, predição, prescrição, interpretação, instruções e outras situações que possuam um número muito grande de variáveis ^[68]. Por sua vez, os SE's devem ter algumas características essenciais, tais como: capacidade de trabalhar com incertezas; capacidade de oferecer explicações ao usuário; flexibilidade de adaptação de sua base de conhecimentos; capacidade de continuar aprendendo ^[69].

Entretanto, o propósito destes sistemas não é substituir o especialista, mas ampliar e disponibilizar para a organização a sua experiência e conhecimentos. Isto porque à medida que novas situações vão sendo identificadas, o acervo da base de conhecimento é realimentado, tornando as novas informações disponíveis para toda a organização, incrementando a produtividade e o acultramento interno da empresa. No contexto do

SI2PL, os SE's executam as funções de busca por similaridade, predição da qualidade e diagnóstico do processo.

Na construção típica de SE's, o engenheiro de conhecimento é responsável por todas as atividades de implementação do sistema. É ele quem define a melhor forma de implementação, repassa o conhecimento do especialista no domínio para a base de conhecimento do SE, testa e valida o sistema ^[70]. Na construção dos SE's inseridos no SI2PL sugere-se uma metodologia de desenvolvimento diferente da tradicional.

Propõe-se disponibilizar na estrutura do SI2PL programas *shells*¹¹ capazes de comunicar com a base de dados da qualidade. Uma vez que os programas *shells* estejam integrados ao SI2PL, somente a base de conhecimento deverá ser desenvolvida, as demais partes que compõem o SE já estão disponíveis no *shell*. A criação da base de conhecimento é a parte mais crítica da implementação de um SE ^[71], a qual é desenvolvida pelo engenheiro de conhecimento. Neste caso, propõe-se que a responsabilidade do engenheiro de conhecimento de criar, atualizar e validar a base de conhecimento seja repassado para dentro empresa, uma vez que num ambiente de PPL existe um grande dinamismo das informações, tornando necessária uma atualização constante da base de conhecimento do SE. Desta forma, a empresa terá condições de avaliar o conhecimento sobre e seus processos e, à medida que novos conhecimentos são aprendidos, as bases de conhecimento dos SE's poderão ser ampliadas ou adaptadas, gerando resultados cada vez mais consistentes.

Para a implementação desses SE's existe um grande número de ferramentas disponíveis, sendo que a melhor escolha não depende somente da aplicação, mas também de outros fatores como: estruturação da base de conhecimento, processo de inferência, facilidade de explicação, interface de desenvolvimento, interface com o usuário, custo e suporte ^[68]. Neste trabalho, para se atingir os objetivos propostos, os critérios considerados determinantes na escolha das ferramentas são:

- Representação do conhecimento: a base de conhecimento deve ser representada simbolicamente e da forma mais clara possível, pois a mesma é de grande importância para o entendimento e melhoria dos processos na empresa.
- Tratamento de incerteza: num ambiente fabril, comumente não se possui um conhecimento de todas as informações necessárias, uma vez que existe um

¹¹ *Shells* - Conjunto de pacotes de software e ferramentas para projetar, desenvolver, implementar e manter SE's. São programas que facilitam a implementação do raciocínio, aquisição e representação do conhecimento. Objetiva facilitar a integração dos SE's com outros tipos de programas.

número muito grande de variáveis envolvidas. Assim sendo, o SE deve possuir um método eficiente para a manipulação da incerteza.

- Criação e atualização da base de conhecimento: a criação e atualização deve ser a mais otimizada possível, devido o fato de que o entendimento das relações de causa-efeito do processo provavelmente acontecerá de maneira gradativa e com melhoria contínua.
- *Shells* disponíveis: a ferramenta adotada deve possuir programas geradores para facilitar e agilizar o desenvolvimento

Desta forma, considerando os objetivos dos três SE's propostos e os critérios apresentados, as escolhas das ferramentas podem ser delineadas em:

1. Ferramentas baseada em regras: Estas ferramentas usam a representação do conhecimento na forma de um conjunto de regras (SE-ENTÃO). As regras constituem a técnica mais comum utilizada pelos SE's, as mesmas são processadas através de um processo de encadeamento para trás ou para frente ou a combinação de ambos. Algumas ferramentas permitem codificar regras sob a presença de incertezas, propagando-as através das inferências e combinações de evidências. Portanto, caso empresa possua condições de discernir claramente todas as informações que envolvem seus processos, as ferramentas baseadas em regras formam a opção mais atrativa para construção dos SE's de predição de qualidade e diagnóstico do processo ^{[68], [72]}.
2. Ferramentas baseados em redes probabilísticas (bayesianas): Estes sistemas utilizam representações gráficas de dependências probabilísticas. Essa representação permite manipular a incerteza com base em princípios matemáticos fundamentados e modelar o conhecimento do especialista de uma forma intuitiva. As redes bayesianas são ferramentas poderosas para criação de modelos causa/efeito ^[73]. A principal vantagem do raciocínio probabilístico sobre raciocínio lógico é fato de que agentes podem tomar decisões racionais mesmo quando não existe informação suficiente para se provar que uma ação funcionará. Desta forma, caso a empresa não possua pleno esclarecimento sobre as informações do seu processo, as redes bayesianas se apresentam como a ferramenta mais apropriada para criação dos SE's de predição da qualidade e de diagnóstico do processo, uma vez que as redes bayesianas permitem adaptar sua base de conhecimento, usando um banco de dados. O aprendizado dos parâmetros é relativamente simples. Entretanto, aprender a estrutura é muito mais difícil, o qual geralmente é realizado com uso de ferramentas indutivas ^[74].

3. Ferramentas de raciocínio baseado em casos: na prática, as ferramentas de raciocínio baseado em casos usam as experiências passadas (casos) para resolver um problema atual. Dado uma especificação de entrada do problema, o sistema irá procurar em sua memória de casos por um caso existente equivalente às especificações de entrada. O sistema poderá encontrar um caso exatamente igual ou aplicar um algoritmo de busca para encontrar um caso similar com as especificações de entrada. Portanto, as ferramentas de raciocínio baseado em casos mostram-se como a opção mais apropriada para a construção do SE de busca por similaridade ^[75].
4. Lógica difusa (fuzzy): é uma técnica que pode resolver problemas de modelagem complexa, com aspectos qualitativos e quantitativos, sujeitos a variações probabilísticas relevantes ou descritos por bases de dados diferentes e incompletas. Seu processo decisório se baseia em variáveis lingüísticas que simulam e replicam elementos do pensamento humano, principalmente em bases comparativas, tais como: grande, pequeno, médio. A lógica difusa assinala a diferentes indivíduos diferentes graus de pertinência a conjuntos adjacentes, de acordo com o grau de superação da condição de pertinência. A transição para a pertinência ao conjunto é gradual, podendo um indivíduo intermediário pertencer aos dois conjuntos, de modo difuso. Desta forma, a lógica difusa pode ser uma alternativa para avaliações complexas de similaridade ^{[76], [77]}.

Cabe ressaltar aqui que além das referências utilizadas, existe na literatura uma vasta quantidade de informações sobre Inteligência Artificial nas quais podem ser explicadas todas as particularidades dos SE's. Para fins desse trabalho o fundamental é esclarecer o propósito dos SE's inseridos no modelo SI2PL.

3.1.2 Estrutura organizacional e responsabilidades requeridas

A proposta do SI2PL de atuar de forma vertical na empresa exige o envolvimento de pessoas de diferentes níveis organizacionais. Por conseguinte, para sua operacionalização é necessária uma estrutura organizacional a qual será hipoteticamente representada por quatro figuras: equipe de desenvolvimento do processo, planejador, analista e operador. Cada qual possui funções e responsabilidades distintas. As informações geradas pelos responsáveis devem ser avaliadas e realimentadas através de quatro níveis de ciclos de controles (Figura 3.3):

- Nível de controle 1: a equipe de desenvolvimento do processo tem um papel fundamental na consistência e abrangência dos resultados gerados pelo SI2PL.

A mesma deve ser capaz de cadastrar e analisar toda a base de dados (*expertise*) necessária para a geração de informações confiáveis ao planejador e ao analista. A equipe de desenvolvimento é responsável pela gestão das bases de conhecimento dos SE's de busca por similaridade, predição da qualidade e diagnóstico dos defeitos;

- Nível de controle 2: com o auxílio dos SE's de busca por similaridade e de predição da qualidade, o planejador deve gerar e atualizar os planos de controle para serem utilizados durante a produção;
- Nível de controle 3: o analista baseado nos dados de inspeção deve ser capaz de monitorar o nível de qualidade e, se necessário, intervir no processo tendo como ajuda para isto o SE de diagnóstico do processo;
- Nível de controle 4: o operador, de posse das instruções de inspeção derivadas dos planos de controle, deve executar os controles e o registro dos dados de inspeção conforme as instruções estabelecidas no plano de controle.

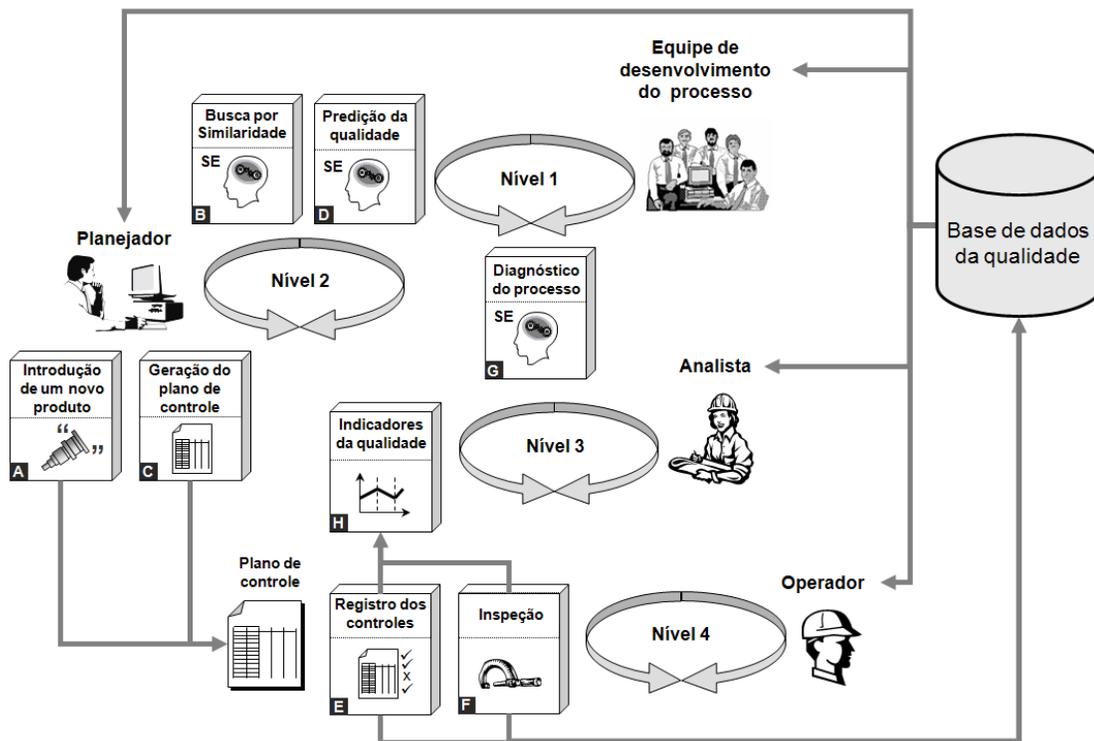


Figura 3.3 – Responsáveis e níveis de controles do SI2PL

Como o objetivo fundamental é atingir a qualidade desejada na produção, os dados de inspeção necessitam ser coletados continuamente para verificar a qualidade atingida no produto e a eficiência dos planos de controles pré-estabelecidos. Enquanto os dados que

formam a base de conhecimento dos SE's devem ser inseridos ou atualizados sempre que houver ausência de informação ou distorção nos resultados. Essas atividades são executadas nos diversos módulos que compõem o SI2PL as quais irão formar a base de dados da qualidade.

Dependendo das características do ambiente de produção, inserir e controlar todas as informações necessárias poderá ser uma tarefa árdua, necessitando ser feito de maneira gradativa. Destaca-se ainda que a estrutura organizacional proposta foi criada seguindo a função lógica de cada um e a necessidades do SI2PL. No entanto, as funções e as responsabilidades podem ser alteradas e adaptadas de acordo com a realidade de cada empresa.

3.1.3 Pré-requisitos da qualidade para operacionalização do SI2PL

As questões citadas a seguir não serão tratadas no contexto desse trabalho, porém elas são fundamentais para o sucesso da PPL e imprescindíveis para a operacionalização do SI2PL na prática e confiabilidade dos resultados.

1. Não serão analisadas as falhas relacionadas ao projeto do produto: é sabido que uma expressiva parte das falhas no ciclo de vida do produto provém das fases de desenvolvimento e planejamento, antes de começar a fabricação ^[31]. Caso essas falhas não sejam descobertas e resolvidas, as mesmas são absorvidas pela fabricação degradando a qualidade do produto e a capacidade dos processos. No entanto, a SI2PL busca obter o melhor, mesmo que o produto não tenha o projeto ideal.
2. Não serão examinadas as incertezas e os erros de medição intrínsecos às operações de inspeção: infelizmente poucas empresas dão devida importância à metrologia no seu ambiente industrial, conseqüentemente os resultados gerados pela inspeção nem sempre são confiáveis ^[66]. No entanto, para fins desse trabalho será considerado que as empresas possuem um programa de gerenciamento dos meios de medição e garantia da qualidade dos resultados, para que os dados gerados pela a inspeção sejam confiáveis.
3. Não estarão contemplados nesse trabalho as ferramentas ou métodos usados no controle do processo, como por exemplo, as cartas de controle: parte-se do pressuposto que os métodos de controle indicados pelo plano de controle serão realizados na íntegra e de maneira adequada pela empresa. Para a realização destes métodos em ambientes de PPL, podem ser seguidas as propostas dos autores citados no Capítulo 2.

4. Não serão realizados estudos preliminares de estabilidade do processo para cada produto: é premissa para determinar a capacidade do processo que o mesmo se comporte de maneira estável. Porém, o dinamismo da PPL muitas vezes não permite o mesmo comportamento do processo ao longo do tempo para os diversos produtos, tornando o estudo de estabilidade mais complexo. Nesse trabalho, a capacidade do processo será representada a partir do acúmulo de conhecimento obtidos das inspeções dos diversos lotes e produtos ^[8].
5. Não faz parte deste trabalho a definição dos parâmetros de controle do processo e seus respectivos limites associados: é indispensável para o rendimento do processo, conhecer as variáveis críticas, configurá-las e controlá-las corretamente. Para isso, a empresa deve conhecer seu processo e desenvolver perfis genéricos de processo que englobem suficientemente a maioria dos produtos a serem produzidos, os quais podem, por exemplo, ser definidos por meio de projeto de experimento (DOE). Assim, pressupõe-se que as especificações das características controladas pelo plano de controle são adequadas para o dado processo.

3.2 DETALHAMENTO DO SI2PL

Conforme mostrado na Figura 3.2, o SI2PL é composto por oito módulos, denominados A, B, C, D, E, F, G e H. Cada um deles possui funções específicas e geralmente compartilham de informações entre si. Todas essas informações são armazenadas numa base de dados comum, denominada de base de dados da qualidade.

Esses módulos formam um modelo conceitual do SI2PL cujo objetivo é descrever a sistemática de operação de todo sistema integrado. Nos itens a seguir apresentam-se detalhadamente as características de cada módulo.

3.2.1 Introdução de um novo produto (Módulo A)

O módulo de introdução de um novo produto é o primeiro módulo a ser acessado, através dele é feito o cadastro dos dados do produto na base de dados da qualidade. Isto se faz necessário para que o SI2PL consiga executar operações de consultas, atualizações, registros e quaisquer outras manipulações de dados relacionados a um produto específico.

A atividade de introdução de um novo produto serve para a identificação e a caracterização dos produtos. Muitas das informações contidas neste módulo são provenientes das fases de desenvolvimento do produto e planejamento do processo (Figura 3.4). As informações de identificação contêm dados gerais sobre o produto, tais como: código, nome do cliente, foto, partes que compõem o produto, etc., cujo objetivo é permitir o

relacionamento dos dados entre os diversos produtos. Já as informações de caracterização dos produtos possuem funções mais específicas dentro do SI2PL.

A caracterização, ou seja, a configuração das características de cada produto, é determinante para a busca e o reaproveitamento das informações de produtos similares (Módulo B). As características de cada produto são configuradas conforme suas particularidades, estas podem estar relacionadas com o tipo de material do produto, formas e dimensões do produto, aplicação do produto, tolerâncias, tipos de processos, e assim por diante.

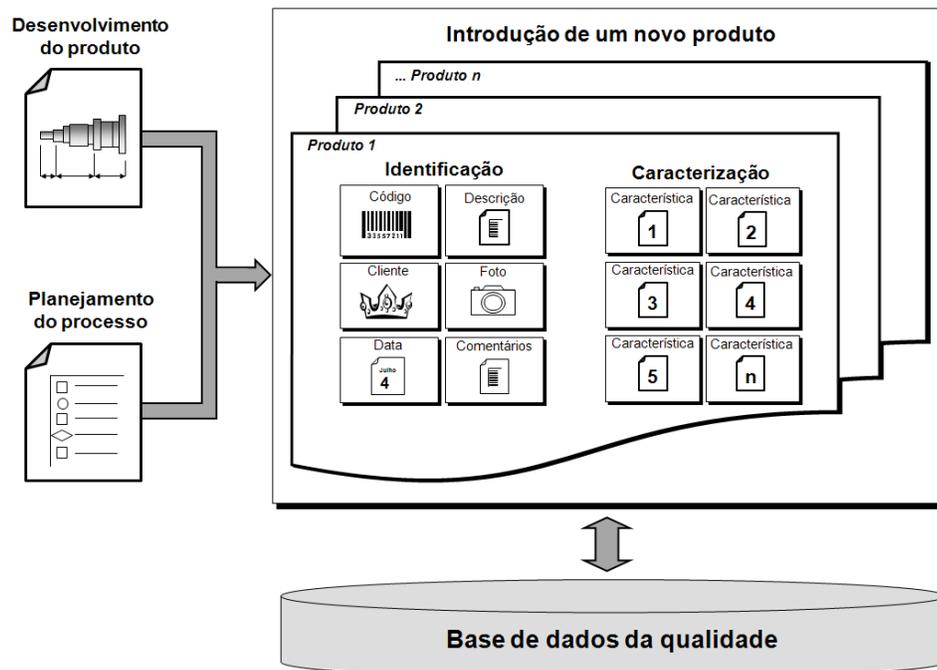


Figura 3.4 - Módulo de introdução de um novo produto (Módulo A)

Visto que uma das grandes complicações de uma empresa que lida com a PPL é o grande volume de informações ^[8], o módulo de introdução do novo produto pode ser ampliado para constituir uma base de dados contendo informações relevantes sobre o produto, com o objetivo de gerar uma documentação eletrônica dos diversos produtos existentes, otimizando a gestão das informações e a comunicação entre os diversos setores da empresa. Quando for viável, é importante que essas informações possam ser inseridas automaticamente para a base de dados da qualidade a partir de softwares de projeto (CAD), planilhas eletrônicas, processadores de texto e outros softwares afins, evitando assim o trabalho de digitação e diminuindo o tempo de atravessamento.

3.2.2 Busca por similaridade (Módulo B)

Conforme já destacado anteriormente, a grande diversidade de produtos na PPL traz uma série de dificuldades para as etapas de planejamento e controle, uma vez que cada produto difere-se dos demais em relação a seu projeto. Cada produto possui suas próprias especificações de materiais, formulação, configuração, propriedades físicas, requisitos de qualidade e confiabilidade, entre outros.

Entretanto, uma simplificação geralmente é possível utilizando o conceito de tecnologia de grupo ^[15]. A tecnologia de grupo, também chamada de produção por famílias, consiste no agrupamento de produtos variados numa mesma família. Essa abordagem utiliza o fato de todos os produtos na mesma família possuem similaridades de requisitos de cliente, especificações de projeto, seqüência de operações, variáveis de processo, instruções de inspeção, e assim por diante. Esta similaridade pode então ser usada como base para a padronização do planejamento e controle da qualidade ^[27].

O conceito de família direciona os esforços para todos os produtos da família. Esses poderão acontecer de diversas formas, como por exemplo, expandindo para todos os membros da família o conhecimento adquirido pelo uso do plano de controle de um lote específico. Uma vez que as ações planejadas tornaram-se eficazes para um lote de um determinado produto, tal conhecimento pode ser usado em benefício dos outros membros da família.

A abordagem descrita previamente também é explorada na área da Inteligência Artificial na qual procura encontrar soluções para um novo problema a partir de soluções correspondentes a problemas semelhantes já resolvidos ^[75]. A concepção do SI2PL propõe aplicar um SE com o intuito de viabilizar o reaproveitamento das informações de produtos já processados, a fim de serem aplicadas na produção de um novo produto ou de um novo lote. Para isto, foi estabelecido um módulo responsável para executar essa tarefa (Figura 3.5).

O objetivo desse módulo é por em evidência o nível de similaridade de um determinado produto em relação aos demais produtos já cadastrados na base de dados. Isso é possível de ser realizado a partir de um algoritmo de similaridade ^[78] e de índices de classificação configurados de acordo com as características de cada produto (Módulo A). Como resultado será apresentada uma lista ordenada da proximidade entre os produtos cadastrados na base de dados e o produto alvo. Com isso, torna-se praticável selecionar um produto de maior similaridade e suas informações reaproveitadas na criação de um novo plano de controle, na previsão da qualidade de um novo lote, no diagnóstico do processo e assim por diante.

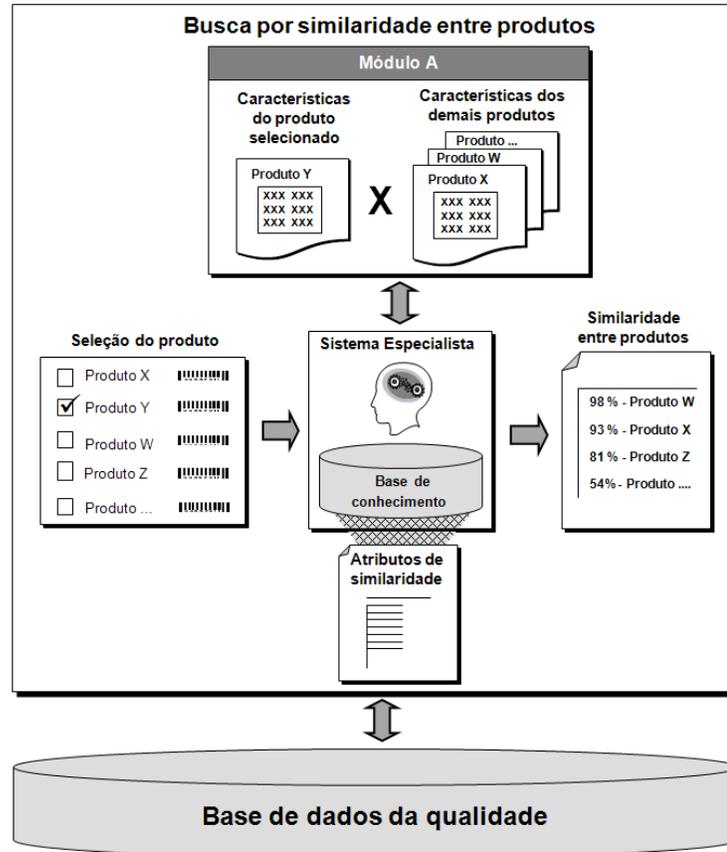


Figura 3.5 - Módulo de busca de similaridade entre produtos (Módulo B)

3.2.3 Geração do plano de controle da qualidade (Módulo C)

Planejar adequadamente a inspeção é um dos fatores fundamentais para uma empresa conseguir o sucesso na PPL [18]. Entretanto, a criação de planos de controles rápidos e eficazes para os diversos produtos é também um dos grandes entraves.

Visando superar esse obstáculo, o SI2PL incorpora o módulo de geração do plano de controle em sua estrutura. Através deste módulo é esperado que o resultado gerado pelos controles estabelecidos no plano de controle seja previsto antes de iniciar a produção, evitando que alterações inesperadas sejam necessárias durante a produção.

O plano de controle é criado quando um determinado produto entra em produção pela primeira vez, podendo ser atualizado quando seu lote de produção é retornado. As informações contidas no plano de controle podem ser inseridas manualmente pelo planejador ou selecionadas de uma base de controles padrões. Os controles padrões são controles de processo ou produto prontamente formatados com as informações que devem ser adicionadas nas colunas do plano de controle (Característica, Especificação, Método de

controle, Frequência, etc.). Através dessas informações, o planejador poderá combinar diferentes controles padrões para formar um plano de controle específico para cada produto. Esses controles devem ser elaborados da forma mais genérica possível, a fim de se adaptar aos diversos tipos de produtos produzidos. Os controles padrões são dependentes da infra-estrutura disponível e da *expertise* da empresa sobre os seus processos. O documento de PFMEA, estudos de otimização do processo (DOE), entrevista com especialistas, consultas bibliográficas, entre outras fontes de informações, são fundamentais para a criação de controles padrões consistentes.

Além disso, o módulo de geração do plano de controle é auxiliado por dois SE's com funções distintas (Figura 3.6). Um deles é usado para auxiliar a seleção de um plano de controle similar e outro para ajudar na definição dos controles.

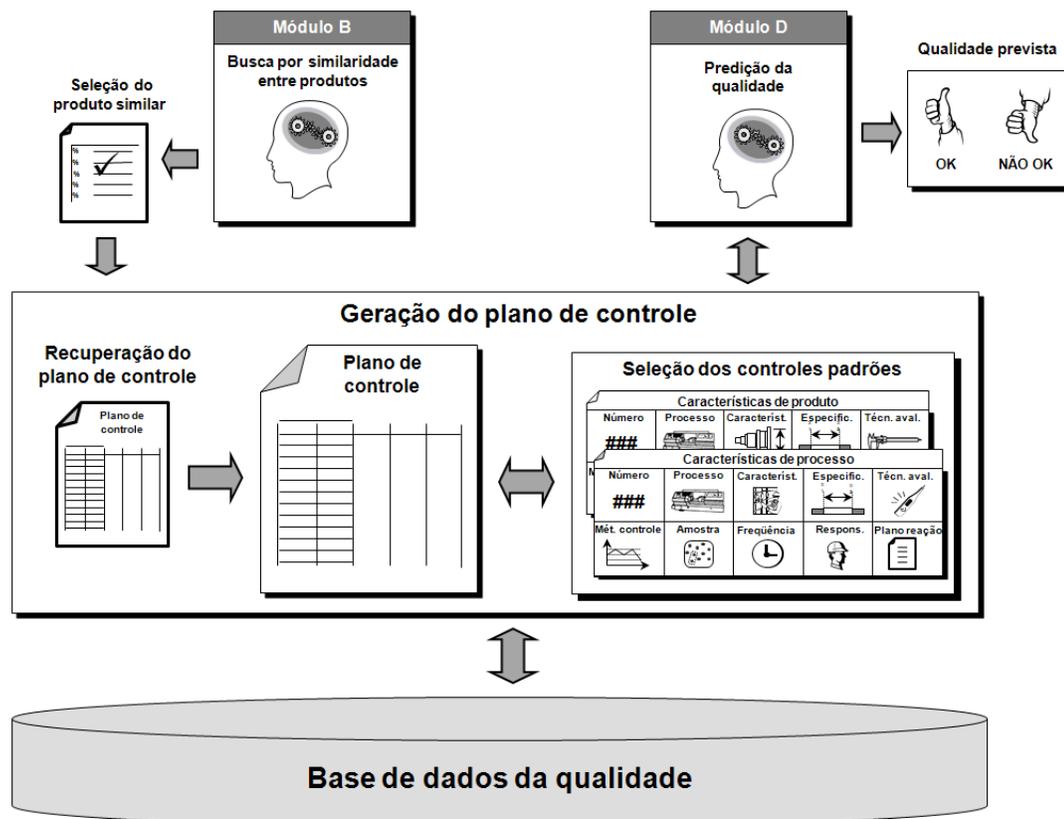


Figura 3.6 - Módulo de geração do plano de controle (Módulo C)

Com o auxílio do SE de busca por similaridade (Módulo B), um plano de controle de um produto similar poderá ser recuperado da base de dados da qualidade todas as vezes que existir a necessidade de gerar um novo plano de controle. Esta operação de reaproveitamento do plano de controle traz um grande benefício na PPL, pois além de

agilizar a etapa de planejamento da qualidade, o resgate informações históricas proporciona um embasamento sólido para a criação de um novo plano de controle.

Entretanto, na PPL cada produto possui particularidades e requisitos de qualidade distintos. Conseqüentemente, o plano de controle de um produto similar pode ainda não existir na base de qualidade ou não ser totalmente adequado para um novo produto, necessitando de ajustes. O SE de predição da qualidade (Módulo D) tem a função de auxiliar o planejador na adequação do plano de controle para um determinado produto. O objetivo deste SE é indicar o nível de qualidade esperada a partir dos controles estabelecidos no plano de controle. Maiores detalhes sobre o SE de predição da qualidade são apresentados no item a seguir.

3.2.4 Predição da qualidade (Módulo D)

A natureza da PPL é caracterizada por uma grande diversidade de produtos. Contudo, os processos de manufatura que produzem esses diversos produtos apresentam algumas combinações singulares de máquinas, métodos, instrumentos, materiais e pessoas envolvidas com a produção. Assim sendo, uma abordagem possível de ser utilizada na PPL é favorecer o monitoramento do processo ao invés do produto ^[28].

Sabe-se que todo processo apresenta variação ^[33]. Essa variação é causada pelas diversas fontes que compõem esse processo, os quais se destacam:

- máquina: desgastes, ajustes, manutenção, condições de uso;
- material: propriedades;
- pessoal: fadiga, treinamento, motivação;
- fatores ambientais: contaminação, temperatura, umidade, ruído, vibração.

A capacidade do processo é influenciada por essa variação e o propósito do plano de controle é indicar as ações que devem ser executadas para caracterizar e controlar essa variação. A função do SE de predição da qualidade dentro do SI2PL é fornecer uma visão antecipada para o planejador sobre a efetividade do plano de controle em relação à qualidade do produto. Desta forma, torna-se possível perceber a relevância que um controle possui sobre a capacidade atingida pelo processo. O foco do SE de predição da qualidade é guardar e transmitir informações valiosas, para corrigir falta ou excessos de inspeção, antes mesmo de iniciar a produção, gerando uma redução nos custos da não-qualidade para a empresa.

No modelo do SI2PL, a base de conhecimento do SE de predição de qualidade deve ser desenvolvida a partir do relacionamento de dois conjuntos de informações (Figura 3.7):

1. Controles padrões: cada controle padrão cadastrado deve estar referenciado na base de conhecimento do SE, a fim de que todas as vezes que este controle for inserido ou retirado do plano de controle atual, o SE possa informar a resultado previsto do nível de qualidade que será atingido pelo processo;
2. Histórico dos controles aplicados e qualidade atingida: são valores de indicadores de qualidade obtidos pela inspeção dos produtos, após serem manufaturados pelos processos e controlados por um conjunto de controles padrões estabelecidos no plano de controle. Como na PPL essas informações são muito dinâmicas, provavelmente a empresa não as possui de forma compilada. Neste caso, o SE deve ser capaz de adaptar automaticamente sua base de conhecimento a partir das informações obtidas do módulo de inspeção (Módulo F) e do módulo de registro dos controles (Módulo E).

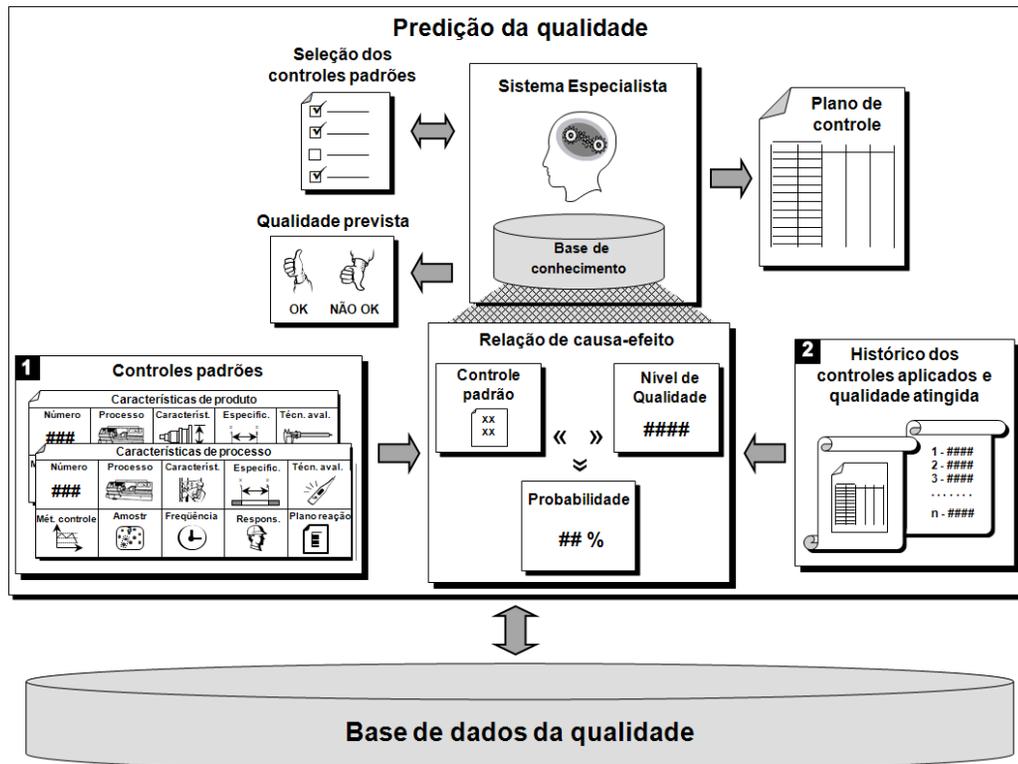


Figura 3.7 – Detalhes do módulo de predição da qualidade (Módulo D)

A criação da base de conhecimento do SE é formada pelo relacionamento de um controle padrão com a qualidade resultante provável. Esta base representa o domínio e a previsibilidade da empresa sobre seus processos no que diz respeito ao nível de qualidade dos diversos produtos produzidos. É possível que esta base de conhecimento necessite ser desenvolvida de forma gradativa, na medida em que novos produtos são produzidos e

novos controles inseridos. É importante destacar que a base de conhecimento do SE de predição da qualidade busca guardar de forma estruturada a informação da eficiência atingida com a aplicação de um conjunto de controles na produção, a fim de esta informação seja reaproveitada para os lotes seguintes.

A partir de sua base de conhecimento, o SE deve ser capaz de interagir com o planejador para informar o resultado previsto da qualidade no produto a partir dos controles padrões selecionados para aquele processo. E dependendo dos requisitos da qualidade necessários, o planejador poderá intensificar os controles de seu processo para melhorar a sua capacidade e assim atingir melhores níveis de qualidade.

3.2.5 Registro dos controles (Módulo E)

No SI2PL o módulo de registro dos controles tem a função de registrar os estados dos controles executados na produção, ou seja, serve para informar se o controle das características estabelecido no plano de controle foi executado como planejado ou não. As informações cadastradas neste módulo servem principalmente para alimentar a base de conhecimento do SE de predição da qualidade (Módulo D). Além disso, as informações podem ser usadas como uma ferramenta para auditar internamente os responsáveis pela execução do plano de controle.

A alimentação dos dados acontece durante a produção de um determinado produto. Para cada característica de produto ou processo a ser controlada deve ser informado ao sistema se o controle: aconteceu realmente, não aconteceu ou aconteceu de forma diferente do estabelecido no plano de controle. Esta informação deve ser registrada de acordo com o número do lote, o código do produto, o processo, etc. (Figura 3.8).

Uma alternativa viável de ser desenvolvida é a integração do módulo de registro dos controles com sistemas de coleta automática de dados do processo. Neste caso, um sistema pode ser concebido de forma que os controles sejam registrados e verificados automaticamente.



Figura 3.8 - Módulo de registro dos estados dos controles (Módulo E)

3.2.6 Inspeção (Módulo F)

O módulo de inspeção (Figura 3.9) dentro SI2PL é um complemento do módulo de registro dos controles (Módulo E). Este módulo tem a função de registrar exclusivamente os dados gerados pela inspeção dos produtos. Neste caso, os dados de inspeção irão gerar informações sobre a qualidade atingida pelo produto, as quais serão utilizadas no cálculo dos indicadores da qualidade (Módulo H) e para solidificar a base de conhecimento do SE de predição da qualidade (Módulos D).

Outro módulo impulsionado pelo módulo de inspeção é o de diagnóstico de processo (Módulo G). Caso a inspeção identifique uma quantidade excessiva de falhas ou não conformidades, o SE de diagnóstico poderá ser consultado para encontrar a causa raiz do problema e corrigir o processo o mais rápido possível. Maiores detalhes sobre o SE de diagnóstico do processo são apresentados no item a seguir.

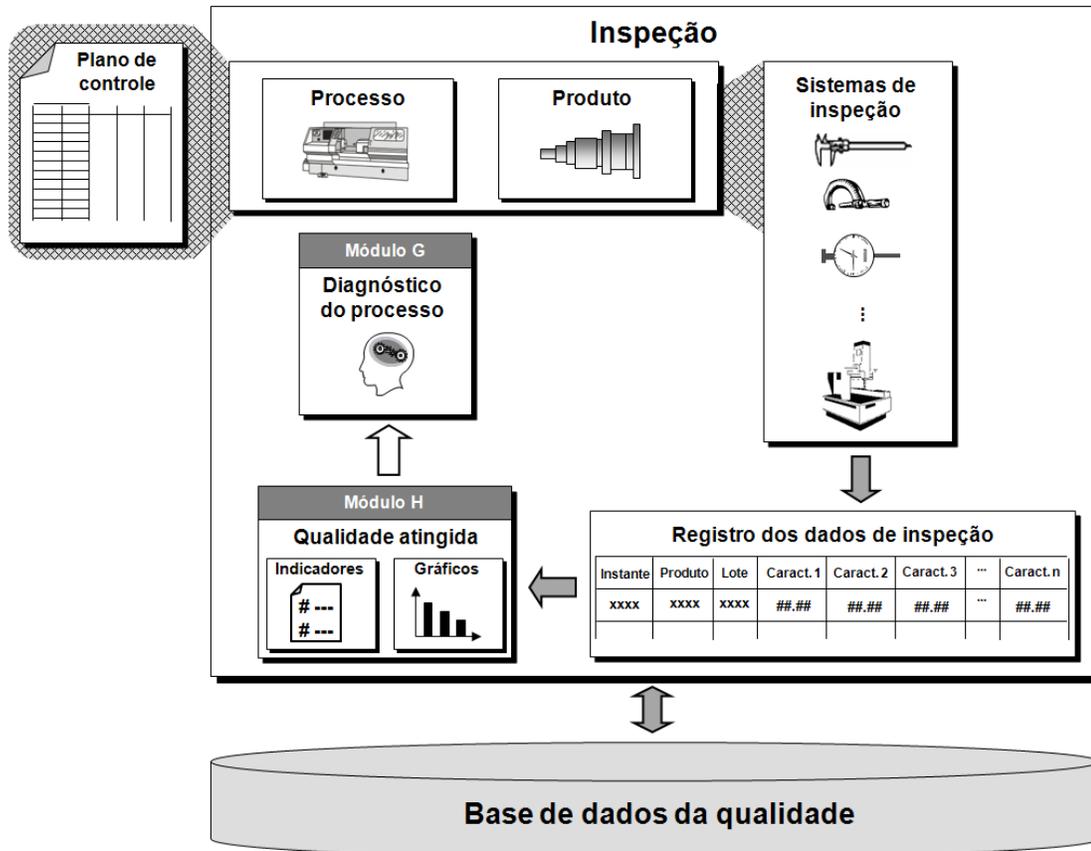


Figura 3.9 – Detalhes do módulo de inspeção (Módulo F)

A operação do módulo de inspeção ocorre durante a produção. Todas as vezes que uma inspeção de produto for executada, a informação gerada deve ser registrada de acordo com o número do lote, o código do produto, o processo, etc. Os dados de inspeção podem vir de diferentes sistemas de inspeção. Entretanto, é importante salientar que nos casos onde a mesma característica é inspecionada por múltiplos sistemas de inspeção, cada um poderá apresentar resultados diferentes para um mesmo produto inspecionado. Neste caso, para que estes dados sejam utilizados na análise de qualidade do processo, no cálculo dos indicadores, para gerar a base de conhecimento do SE de previsão da qualidade ou em qualquer outro momento, talvez seja necessário que exista um tratamento prévio do nível de incerteza desta informação. Nos casos possíveis, é conveniente que o módulo de inspeção esteja integrado a sistemas de coleta automatizados, de modo que os dados possam ser adquiridos automaticamente, sem a intervenção humana.

3.2.7 Diagnóstico do processo (Módulo G)

Na PPL, o tempo ou a quantidade de amostras pode não ser suficiente para executar ajustes no processo durante a produção. Assim sendo, o objetivo do módulo de

diagnóstico do processo é dispor de um SE para auxiliar na compreensão e correção das causas dos problemas, a fim de que o processo seja corretamente configurado durante o *setup* e desvios sejam rapidamente corrigidos durante a produção. Além disso, o SE de diagnóstico do processo é uma ferramenta eficaz na capacitação de funcionários sobre os processos produtivos, uma vez que esta pode disponibilizar um amplo conhecimento sobre processo de forma sistematizada e amigável. Deste modo, todos aqueles envolvidos na produção terão condições de resolver problemas utilizando os mesmos procedimentos e com similar eficiência.

A criação da base de conhecimento do SE de diagnóstico do processo acontece a partir do levantamento das possíveis causas raízes dos desvios da qualidade dos produtos e as ações necessárias para que essas causas sejam solucionadas. A base de conhecimento deve ser estabelecida de modo a priorizar as causas que possuem uma maior probabilidade de gerar um determinado problema da qualidade (Figura 3.10).

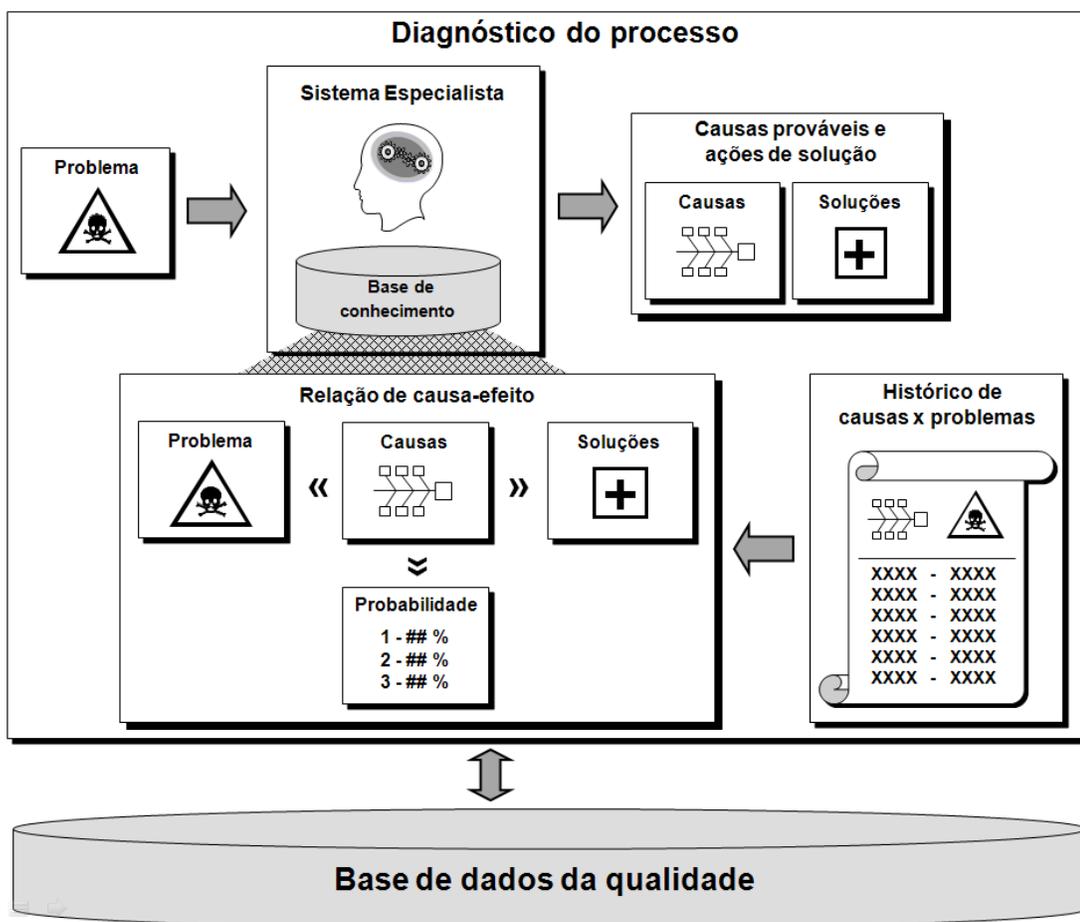


Figura 3.10 – Módulo de diagnóstico do processo (Módulo G)

Caso a empresa não possua domínio dessas informações, é necessário primeiramente criar um histórico dos tipos de causas e dos problemas gerados durante a produção. Estas informações servirão para construir uma base de conhecimento do SE, podendo ser atualizada sempre que houver necessidade.

O SE de diagnóstico do processo poderá ser consultado todas as vezes que o processo estiver produzindo produtos fora de especificação. O SE irá interagir com o usuário (operador/analista) para determinar as prováveis causas raízes dos problemas e as ações necessárias para que o problema seja solucionado. O usuário, por sua vez, irá executar as ações propostas pelo SE e verificar se o problema foi resolvido. Em caso positivo, a causa raiz deve ser registrada na base de dados da qualidade, relacionando com o problema que foi gerado. Estas informações poderão ser usadas para a atualização da base de conhecimento do SE e na melhoria contínua da qualidade.

É importante destacar que nos momentos em que uma causa raiz não estiver sendo indicada pelo SE ou quando o mesmo não encontrar respostas ou gerar respostas inadequadas, a base de conhecimento do SE deverá ser melhorada.

3.2.8 Indicadores da qualidade (Módulo H)

É fundamental para uma empresa dispor de indicadores da qualidade padronizados. Uma vez classificados e condensados, os indicadores permitem gerar informações sobre a situação e a evolução da qualidade. A partir destes é possível descobrir problemas sistêmicos, introduzir melhorias e contribuir para elevar a motivação e o rendimento. Adicionalmente, os indicadores permitem realizar comparações com determinadas normas ou *benchmarking*¹² de mercado, e assim, tomar consciência sobre os níveis de qualidade praticados pela empresa^[31].

O SI2PL agrega um módulo voltado para indicadores da qualidade do processo e do cliente. Os indicadores são compilados a partir das informações cadastradas na base de dados da qualidade durante as operações de inspeção e pela realimentação dos clientes. Para facilitar a avaliação dos diversos lotes de produção, propõe-se o uso de métodos gráficos para representar os resultados de forma clara. Diversos filtros e critérios de classificação dos dados podem ser usados na criação dos gráficos. Tais gráficos visualizam os dados e permitem aplicar seus resultados nas diversas áreas (Figura 3.11).

¹² *Benchmarking - abordagem sistemática para identificar padrões quantitativos de comparação.*

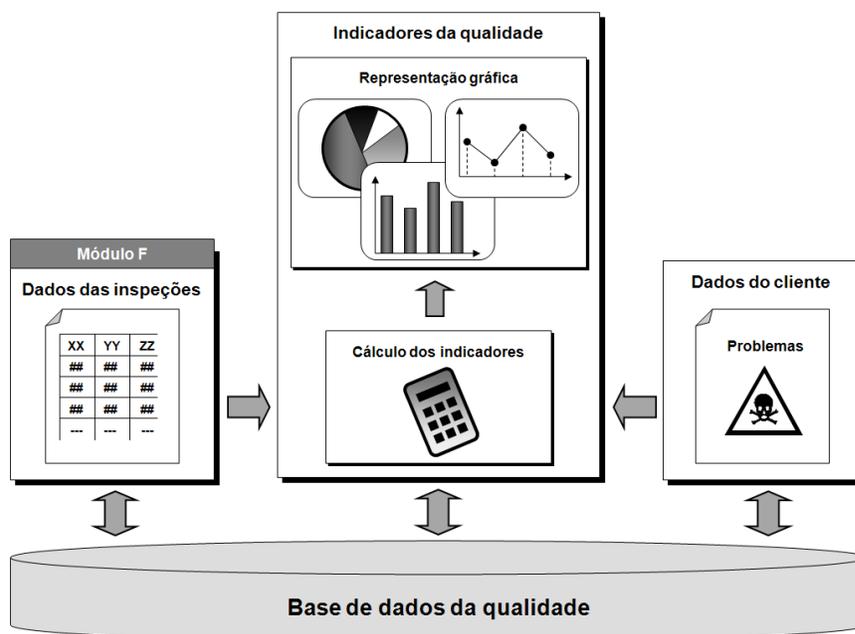


Figura 3.11 - Cálculo e representação gráfica dos indicadores da qualidade (Módulo H)

Existem na bibliografia diversos algoritmos e fórmulas que permitem determinar indicadores aplicáveis aos mais variados casos. Contudo, neste trabalho não será citado um tipo particular de indicador para ser aplicado ao modelo do SI2PL. Para selecionar um indicador mais adequado é necessário identificar algumas características peculiares, tais como: tipo de produto e processo, valores disponíveis, tipo e magnitude de comparação, etc. Alguns exemplos de indicadores de qualidade bastante difundidos são: rendimento (*yield*)¹³, DPU¹⁴, DPMO¹⁵, Cp, Cpk¹⁶, entre outros.

As informações geradas pelos indicadores da qualidade podem ser usadas de forma vertical na empresa. No nível operacional, os indicadores podem ser usados pelos analistas da qualidade e operadores das máquinas para ajustar imediatamente o processo. Enquanto que no nível de planejamento esses indicadores servem para os planejadores atualizar e corrigir os planos de controle e melhorar os processos e, finalmente, no nível gerencial para a tomada de decisões estratégicas. Além disso, para que a empresa possa ter uma percepção real da efetividade das inspeções e do sistema de garantia da qualidade como um todo, é fundamental possuir indicadores de qualidade no cliente, principalmente na PPL,

¹³ Rendimento (*yield*): é o total de produtos aceitos dividido pelo total de produtos inspecionados.

¹⁴ DPU: Defeitos por Unidade - é o número de defeitos dividido pelo número de unidades.

¹⁵ DPMO: Defeitos por Milhão de oportunidades - é o número de defeitos, dividido pelo número de oportunidades de defeitos, multiplicado por um milhão.

¹⁶ Cp, Cpk: Índices de capacidade de processos - o cálculo do Cp leva em conta apenas as especificações do processo e sua variabilidade. Assim, conclui-se que o Cp mede a capacidade potencial do processo. Por sua vez, o cálculo do Cpk leva em consideração o valor da média do processo. Logo, o Cpk pode ser interpretado como uma medida da capacidade real do processo.

onde a terceirização da produção é uma característica marcante. Com a terceirização, nem sempre a empresa que produz em pequenos lotes é quem executa todos os testes nos produtos, assim como também não executa serviços de reparos em campo. Entretanto, torna-se obrigatório possuir indicadores de qualidade que monitoraram os defeitos encontrados nos testes no cliente da empresa ou através dos serviços de assistência técnica no cliente final.

Destaca-se também que os indicadores da qualidade no cliente formam uma importante ferramenta para avaliar a eficiência do plano de controle, pois através destas informações é possível verificar se os defeitos gerados durante a produção estão sendo detectados internamente pela empresa ou estão vazando para o cliente. Com isto, pode ser feito uma verificação mais apurada dos controles de inspeção e atualizar o plano de controle a partir destas informações.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O SI2PL

O modelo estrutural do SI2PL buscou atender os principais problemas da qualidade que ocorrem principalmente na PPL. A Tabela 3.1 apresenta uma visão geral de como cada módulo do SI2PL pretende atuar nos problemas da qualidade apontados nos capítulos anteriores.

Tabela 3.1 – Visão geral de atuação do SI2PL nos problemas da qualidade

SI2PL - Sistema Integrado para Produção em Pequenos Lotes		Ferramentas principais								Atuação acumulada de cada módulo	
		Base de dados da qualidade	Sistemas Especialistas	Métodos de eng. da qualidade	Sistemas Especialistas	Base de dados da qualidade	Base de dados da qualidade	Sistemas Especialistas	Métodos de eng. da qualidade		
Problemas da qualidade		Módulos									
		A	B	C	D	E	F	F	H		
		Introdução de um novo produto	Busca por similaridade	Geração do plano de controle	Predição da qualidade	Registro dos controles	Inspeção	Diagnóstico do processo	Indicadores da qualidade		
Planejamento	Falta de informações adequadas para o planejamento	0	5	0	10	5	5	0	10	35	85
	Dificuldade de gerenciar as informações	10	0	10	5	5	0	0	0	30	
	Tempo reduzido para planejamento da qualidade	0	10	0	10	0	0	0	0	20	
Controle	Informação / tempo insuficiente para setup do processo	0	0	0	0	0	0	5	5	10	30
	Dificuldade no diagnóstico de falhas e NC (encontrar as causas)	0	0	0	0	0	0	10	0	10	
	Tempo reduzido para implementação de ações corretivas	0	0	0	0	0	0	10	0	10	
Melhoria	Dificuldade de conhecer e caracterizar o processo	0	5	0	0	0	10	0	10	25	45
	Dificuldade de implementar as melhorias e medir seu impacto	0	0	0	0	0	5	5	10	20	

Atuação dos módulos do SI2PL nos problemas da qualidade

0	5	10
Baixa	Média	Alta

Numa visão geral de cada módulo do SI2PL é possível verificar que:

- Módulo A (Introdução de um novo produto): através do cadastro individual de cada produto, este módulo atua no problema de gerenciamento das informações, permitindo executar operações de registro, consultas e atualizações de informações dos diferentes tipos de produto;
- Módulo B (Busca por similaridade): através do auxílio para o reaproveitamento das informações de produtos semelhantes já processados, a fim de serem aplicadas na produção de um novo produto, este módulo permite atuar no problema da falta de informações adequadas e principalmente no problema do tempo reduzido para o planejamento da qualidade;
- Módulo C (Geração do plano de controle): este módulo permite o cadastro, consulta e atualização do plano de controle para cada tipo de produto, auxiliando assim, no problema de gerenciamento das informações durante o planejamento da qualidade;
- Módulo D (Predição da qualidade): através de uma base de conhecimento de controles padrões vinculada à previsibilidade da qualidade gerada pelo processo em relação a estes controles, este módulo atua no problema do gerenciamento das informações e principalmente nos problemas da falta de informações adequadas e no tempo reduzido para o planejamento da qualidade;
- Módulo E (Registro de controle): através do registro dos controles aplicados durante a produção, a fim de verificar a aplicabilidade real do plano de controle na prática, este módulo permite atuar no problema da falta de informações adequadas e no gerenciamento das informações da qualidade;
- Módulo F (Inspeção): através da coleta e registro dos dados de inspeção no produto, este módulo permite atuar diretamente nos problemas de conhecer e caracterizar o processo, além disso, este módulo permite auxiliar parcialmente no problema da falta de informações adequadas para o planejamento e na dificuldade de implantar as melhorias e medir seu impacto;
- Módulo G (Diagnóstico do processo): através da criação de uma base de conhecimento estruturada contendo as causas raízes dos defeitos e as ações de solução, somados a um mecanismo sistematizado e amigável de consulta, este módulo permite atuar nos problemas de diagnóstico de falhas e NC e de tempo reduzido para implementação de ações corretivas, e ainda parcialmente, nos

problemas de informação/tempo insuficiente para *setup* do processo e dificuldade de implementar as melhorias e medir seu impacto;

- Módulo H (Indicadores da qualidade): através do cálculo e representação gráfica dos indicadores da qualidade de processo e cliente, este módulo auxilia a conhecer e caracterizar o processo, dificuldade de implementar as melhorias e medir seu impacto e de falta de informações adequadas para o planejamento, além disso, atua de forma parcial no problema de informação/tempo insuficiente para *setup* do processo.

A partir desta visão geral, também é possível notar que atuação o SI2PL ocorre de forma mais intensa no planejamento da qualidade, em seguida na melhoria da qualidade e por último no controle da qualidade. Isto mostra que a estruturação do SI2PL está coerente com a estratégia já citada no capítulo anterior na qual na PPL é necessário dispensar os maiores esforços na etapa de planejamento. Destaca-se também, que o nível de atuação do SI2PL poderia ser expandido para a etapa de controle da qualidade caso fosse inserido um módulo específico para controle dos processos, como por exemplo, CEP para corrida curta, o qual neste trabalho não foi explorado por questões de escopo.

Para se atingir o sucesso na implantação do SI2PL é indispensável que a empresa esteja comprometida e que esta possua um razoável conhecimento de seu processo fabril, a fim de que todas as informações requeridas possam ser preenchidas e que o conteúdo dessas informações retrate realmente o ambiente produtivo da empresa. Além disso, é necessário que o SI2PL seja aplicado num ambiente de produção flexível, onde diferentes tipos de produtos são produzidos utilizando os mesmos recursos de produção.

4 DESENVOLVIMENTO DO SI2PL PARA OS PROCESSOS DE MONTAGEM DE PLACAS ELETRÔNICAS

Este capítulo aborda uma aplicação do SI2PL para os processos de montagem de placas eletrônicas. Primeiramente é feita uma breve discussão sobre os processos de montagem de placas eletrônicas e a relevância deste segmento para os propósitos desta tese. Em seguida, apresenta-se uma descrição detalhada do desenvolvimento da ferramenta computacional para este setor baseada no modelo do SI2PL.

4.1 O PROCESSO DE MONTAGEM DE PLACAS ELETRÔNICAS

A montagem eletrônica, especialmente uma linha de montagem de placas eletrônicas, comumente é configurada como um sistema de manufatura flexível (FMS). Contudo, a terminologia associada ao FMS, oriunda da indústria metal-mecânica, pode ser confusa quando aplicada à indústria de montagem eletrônica. Por exemplo, o conceito de ferramenta refere-se ao alimentador (*feeder*), o qual contém o componente eletrônico para ser montado. Em vez da ferramenta verdadeira, está o bocal (*nozzle*) que executa a operação de inserção. Contudo, quando corretamente ajustada, a linha de montagem de placas eletrônicas permite uma rápida troca de um produto para o outro, produzindo uma grande diversidade de produtos com uma confiabilidade bem maior se comparados a processos não automatizados^[81].

Existem dois tipos básicos de tecnologia de montagem de placas eletrônicas: a tecnologia de montagem através de furos THT e a tecnologia de montagem em superfície SMT. A Figura 4.1 mostra o esquema de montagem e um exemplo de placa eletrônica de cada tecnologia^[82].

A tecnologia de montagem através de furos (THT) dominou o mercado até o final dos anos 80, mas vem sendo substituída pela montagem em superfície. Atualmente, menos de 15% do total de componentes produzidos mundialmente são para serem montados em placas de tecnologia THT^[83]. O processo de montagem THT consiste basicamente de duas atividades fundamentais: inserção manual ou automática de componentes e soldagem dos componentes pela máquina de solda por onda^[84].

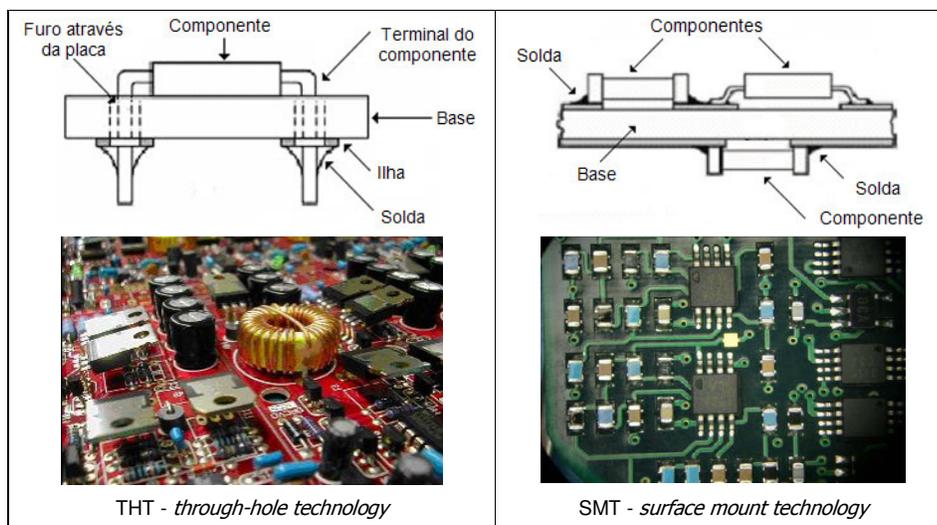


Figura 4.1 - Placas eletrônicas de tecnologias THT e SMT

O processo de montagem SMT é um processo totalmente automatizado e possui uma eficiência bem mais alta quando comparado ao processo de montagem THT. O processo de montagem SMT mais tradicional geralmente consiste de três sub-processos: aplicação de pasta de solda, inserção de componentes e soldagem por refusão. Adicionalmente, existem outros tipos de máquinas e processos que realizam a montagem de outros tipos de componentes SMT, como por exemplo: COB¹⁷ e flip chip¹⁸.

4.1.1 Garantia da qualidade nos processos de montagem de placas eletrônicas

A cada ano a indústria eletrônica vem introduzindo placas de tamanhos cada vez menores, com mais funções, maior confiabilidade e custos reduzidos. Por essa razão, os processos de montagem de placas eletrônicas requerem cada vez mais alta agilidade, confiabilidade e flexibilidade.

O fluxo de montagem de uma placa eletrônica está relacionado com os diferentes tipos de placas e de componentes. Dependendo de sua característica ou necessidade, um produto poderá conter somente componentes THT, somente componentes SMT ou ambos. Além disso, os componentes podem ser montados em uma ou em ambas as faces da placa. Dessa forma, existem fluxos de processo diferentes para cada tipo de montagem de placa, porém, sempre seguindo uma seqüência obrigatória^[85].

¹⁷ COB (Chip-on-Board): Nesta tecnologia a pastilha do circuito integrado sem o encapsulamento (chip) é colada diretamente sobre a placa eletrônica e as interligações entre ambas são feitas com fios muito finos

¹⁸ Flip Chip: chip semiconductor cuja face inferior é conectada com um encapsulamento, substrato ou placa.

Durante os vários processos necessários para montar a placa eletrônica, existem diversas oportunidades de defeitos ocorrerem, os quais podem ser divididos em quatro categorias: defeito de componente (componente eletricamente defeituoso, componente danificado, componente com terminal danificado, etc.), defeito de montagem (placa suja, placa delaminada, bolas de solda, etc.), defeito de inserção (componente faltando, componente invertido, componente desalinhado, etc.) e defeitos de terminação (curto, excesso de solda, ausência ou insuficiência de solda, etc.)^{[86], [87]}.

Qualquer um destes defeitos irá resultar em alguma limitação no desempenho do produto. Existem defeitos (p.e.: falta de componente, curto) que impedem diretamente a funcionalidade da placa, enquanto outros (p.e.: 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 dificuldade de detecção depende do tipo de defeito e outros fatores como a densidade de componentes na placa e o formato do componente. Alguns dos defeitos mais difíceis de serem detectados são: componente eletricamente defeituoso, ausência ou insuficiência de solda e buracos na solda^[85].

A ocorrência dos diferentes tipos de defeitos não se dá na mesma proporção, sendo dependente dos processos, materiais e componentes utilizados. No processo de montagem SMT, estima-se que 60% dos defeitos são originários da etapa de deposição de pasta de solda^[88]. Já nos processos de montagem THT foi verificado que mais de 50% dos defeitos são causados pela máquina de solda por onda^[89].

Quase a totalidade dos diversos tipos de defeitos gerados no processo de montagem das placas eletrônicas é controlada de forma atributiva, o que dificulta muito a inspeção e o controle do processo. Além disso, a quantidade de variáveis de processo é muito grande. Somente no processo de aplicação de pasta de solda estima-se que cerca de 40 variáveis influem no resultado final do processo, tornando complexa a identificação da causa raiz que originou o defeito^[90]. A complexidade do produto também influi muito na sua qualidade final, quanto maior a quantidade de componentes, terminações, etapas de montagem e assim por diante, maior será a oportunidade dos defeitos ocorrerem.

Para prevenir ou corrigir esses defeitos requer-se um conhecimento apurado das relações de causa e efeito do processo de montagem. No entanto, uma inspeção 100% do produto no final da linha sempre se torna necessária, pois a inspeção por amostragem pode causar erros do Tipo I e II^[91]. Há empresas que adotam a inspeção 100% após cada etapa de processo para evitar o retrabalho e corrigir o processo o mais rápido possível.

Existem várias técnicas de inspeção e teste de produtos utilizados no processo de montagem de placas eletrônicas, dentre essas merecem destaque: inspeção manual visual (MVI) ou inspeção humana, inspeção óptica automática (AOI), inspeção raio-X manual e automática (AXI), testes de circuito (ICT) e teste funcional (FT). Cada uma dessas técnicas de inspeção e teste possui características únicas de custo-benefício, sendo que nenhuma é 100% eficaz para todas as ocasiões ou para todos os defeitos, tornando necessário combinar racionalmente várias delas para garantir a qualidade da placa^[92].

Como se pode observar, o processo de montagem de placas eletrônicas envolve um grande número de fatores relacionados a produto e processo que podem gerar defeitos, influenciando diretamente na qualidade final do produto. Para prevenir e controlar esses defeitos é fundamental conhecer os tipos, as causas e as conseqüências de cada defeito, bem como, as variáveis críticas do processo e os sistemas de inspeção e testes capazes de detectá-los.

4.1.2 Relevância da aplicação do modelo SI2PL nos processos de montagem de placas eletrônicas

O modelo do SI2PL foi desenhado para atuar de forma genérica, a fim de se atingir os objetivos estabelecidos em diferentes ambientes de PPL. No entanto, é plausível que nem todos os módulos contidos no SI2PL se adaptem perfeitamente a todos os ambientes de produção, sendo necessário algum tipo de adaptação para que possam ser implantados. E ainda, é possível que novos módulos precisem ser adicionados ao modelo para expandir seu nível de funcionalidade. Desta forma, faz-se necessária a aplicação do SI2PL em setores produtivos reais para que estes fatores sejam analisados.

A aplicação do modelo SI2PL para os processos de montagem de placas eletrônicas permite analisar de forma estratégica a adequabilidade e abrangência dos seus diferentes módulos e sua eficiência em frente aos propósitos estabelecidos, uma vez que estes processos são caracterizados por uma série de particularidades:

- A produção lida com uma ampla variedade de produtos, desde produtos simples com baixo valor agregado até produtos muito complexos e de alto valor;
- O volume de produção dos diferentes tipos de produtos pode variar numa faixa muito ampla, desde milhões até menos que dez;
- Os processos de montagem de placas eletrônicas são complexos e difíceis de serem controlados;

- A inspeção e testes das placas eletrônicas são sempre necessários e geralmente laboriosos de serem realizados, sendo utilizados normalmente padrões atributivos.
- Muitos dos conceitos originados dos problemas de agrupamento e carregamento nos FMS e manufatura celular podem ser adaptados para tratar os problemas na montagem de placas eletrônicas ^{[93], [94]}.

Normalmente, todos os problemas da qualidade tratados nesta tese são enfrentados por empresas montadoras de placas eletrônicas, de forma mais intensa pelas empresas que atuam como CM's. Estes problemas, quando não são corretamente solucionados, fazem com que os custos da qualidade aumentem e conseqüentemente os lucros destas empresas sejam reduzidos. Entretanto, além de permitir uma avaliação detalhada do modelo do SI2PL, o desenvolvimento de uma solução voltada para este setor poderá ser aplicada de forma generalizada a todas as empresas montadoras de placas eletrônicas. Além disso, a mesma solução poderá ser facilmente adaptada para os outros setores produtivos, em especial àqueles nos quais o controle de inspeção é predominantemente realizado por atributos, como por exemplo, linhas de montagem e integração de produtos em geral.

Por fim, destaca-se que embora os produtos fabricados sejam totalmente diferentes, os processos de montagem de placas eletrônicas possuem algumas características comuns com alguns processos dos setores metal-mecânico, particularmente com os processos de usinagem. Esta similaridade ocorre na etapa de inserção de componentes SMT, na qual as máquinas de inserção de componentes possuem uma topologia parecida com as máquinas de usinagem CNC. Desta forma, a partir de uma solução desenvolvida para o setor eletro-eletrônico, torna-se mais próximo de mensurar adequabilidade do SI2PL para os processos de usinagem do setor metal-mecânico e o nível de complexidade para sua implantação.

4.2 O PCBA SMARTQUALITY

Com o objetivo de viabilizar a implantação do SI2PL num ambiente fabril de montagem de placas eletrônicas, desenvolveu-se um aplicativo (software) contendo todas as funções estabelecidas pelo modelo. O aplicativo desenvolvido, nomeado de PCBA SmartQuality (*Printed Circuit Board Assembly SmartQuality*), apresenta um menu principal para navegar em todas opções do aplicativo, as quais foram agrupadas em quatro sub-menus: Introdução do novo produto, Planejamento da inspeção, Inspeção e Controle dos dados da inspeção. Em conjunto com o software está a base de dados relacional contendo as tabelas para os registros dos dados, os componentes de programas *shells* para a

execução dos SE's e um software para visualização das informações exportadas pelo PCBA SmartQuality.

Para a programação do aplicativo PCBA SmartQuality optou-se pela plataforma de desenvolvimento Borland Delphi, para a criação e o gerenciamento da base de dados escolheu-se o software Firebird, para criação e execução dos SE's os *shells* ExpertSinta e Netica e para visualização das informações exportadas o software Microsoft ExcelTM. Os motivos que levaram esta escolha foram principalmente: compatibilidade, custo, afinidade do autor e simplicidade das ferramentas. O diagrama da Figura 4.2 ilustra os componentes utilizados para a implementação do SI2PL.

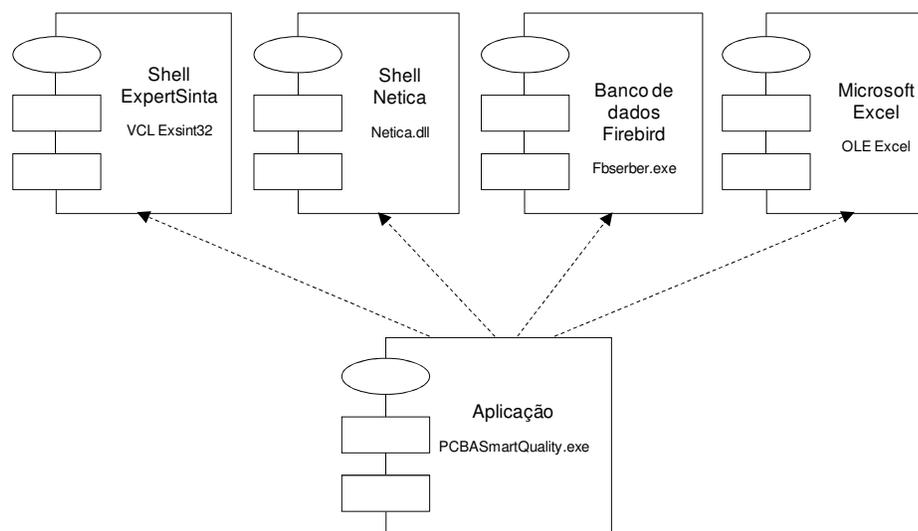


Figura 4.2 – Diagrama de Componentes para implantação do SI2PL no processo de montagem de placas eletrônicas

Nessa arquitetura, o software PCBA SmartQuality, que contém toda a funcionalidade do SI2PL, bem como todos os outros softwares que o complementam (Firebird, ExpertSinta e Netica) são instalados num servidor de rede Intranet (dentro da empresa). Dessa forma, todos os computadores que estão ligados na rede interna, distribuídos em vários setores de uma empresa, têm capacidade de acessar todas as opções do software, consultar e alterar informações contidas na base de dados. Para isto, é necessário que cada um dos computadores clientes esteja instalado o gerenciador de base de dados Firebird-Cliente e o software Microsoft ExcelTM. As alterações das informações na base de dados foram restringidas de acordo com a identificação (*login*) do usuário, a qual é obrigatória quando o aplicativo é iniciado.

A seguir é explorado com maiores detalhes os quatro sub-menus do software PCBA SmartQuality. Destaca-se que o desenvolvimento do software aconteceu de forma gradativa e simultânea, não seguindo exatamente a mesma seqüência dos módulos do SI2PL.

4.2.1 Introdução do novo produto

O sub-menu “Introdução do novo produto” do software PCBA SmartQuality abrange os módulos A e B do SI2PL. Sua função é criar uma base de informações sobre os produtos, a qual será utilizada pelo software para execução de tarefas específicas como: totalizar as oportunidades de defeitos por placa, listar os valores de referência dos componentes de cada placa durante a inspeção, gerar modelos gráficos da placa, e assim por diante. Além disso, nesse sub-menu são definidos e configurados os índices de classificação usados na comparação de similaridade entre os produtos. A Figura 4.3 ilustra o diagrama de Casos de Uso do sub-menu Introdução do novo produto.

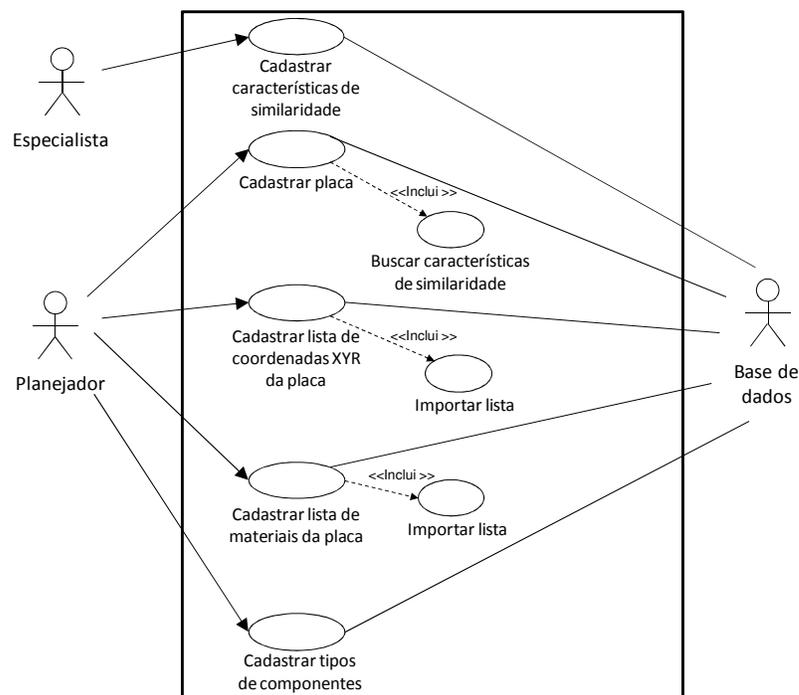


Figura 4.3 - Diagrama de Casos de Uso do sub-menu Introdução do novo produto

O desenvolvimento do módulo de Introdução do novo produto (Módulo A do SI2PL) baseou-se nas informações mínimas necessárias para gerenciar os diversos produtos e na operacionalização geral do software. Devido à grande quantidade de informações requeridas, optou-se em dividi-las em quatro formulários:

1. Identificação da placa eletrônica: são informações gerais como: código, nome, cliente, descrição, foto, etc. que servem para criar uma identidade única para cada

modelo de placa eletrônica montada na empresa. Neste formulário também são configuradas as características para comparação entre as placas.

2. Lista de coordenadas XYR: lista gerada pelo programa de desenvolvimento (CAD) da placa eletrônica, que relaciona, para cada componente, uma descrição de referência na placa, a posição física (eixo X, eixo Y e rotação R), o código e face da placa onde está localizado. No processo de montagem de placas eletrônicas a lista de coordenadas XYR serve principalmente para programar as máquinas de inserção de componentes e alguns tipos de sistemas de inspeção de produto. Dentro do software, a lista de coordenadas XYR é utilizada em conjunto com a lista de componentes para criar um modelo gráfico da placa, a fim de otimizar coleta e análise dos dados de inspeção.
3. Lista de materiais: informa a quantidade, o código e a descrição de referência de cada tipo de componente. Esta lista serve de orientação durante a conferência de material, *setup*, montagem, inspeção ou retrabalho. A lista de materiais deve estar rigorosamente de acordo com a lista de coordenadas XYR, no contrário alguma especificação de montagem da placa não estarão correta.
4. Componentes: serve para cadastrar as características de todos os possíveis formatos de componentes que podem ser montados pelo processo. O software utiliza a lista de componentes para cálculo dos indicadores e para gerar o modelo gráfico da placa.

Todas as informações do módulo de Introdução do novo produto são provenientes das etapas de desenvolvimento do produto. Para agilizar o cadastro no software, foi criada a opção de importar dados de arquivos no formato texto e inserir automaticamente na base de dados do sistema.

A Figura 4.4 ilustra detalhes do formulário onde são inseridas as informações gerais da placa e suas características de comparação.

Informações gerais das placas de circuito impresso

Voltar Arquivo Configurações Exibir

Voltar Clientes Características Processos

Placa de circuito impresso

Linha: 16/22

- CMR_CAM
- GT650
- GTACQUA
- HERCULES
- IMS_500_FONTE_CPU
- IMS_500_MEDIÇÃO
- IMS_CPU
- IMS_FONTE
- IMS_TRASEIRA
- REINAX
- NOTE**
- SF-013_DSI

Informações

Código: NOTE Cliente: Cliente A

Nome: Notebook

Descrição:

Ajustar imagem Face de cima (Top) Face de baixo (Bottom)

Características

- Componente BGA = Possui
- Componente Chip = Possui
- Componente Fine-pitch = Possui
- Densidade de componentes = Alta
- Furo da placa = Revestido (PTH)
- Liga de solda = Estanho/Chumbo
- Montagem = SMT/THT Top e SMT Bottom
- Máscara de solda = Possui
- Pontos de testes = Alto (mais de 70%)
- Projeto da placa = Adequado
- Projeto do estêncil = Adequado
- Revestimento da placa = Estanho (Lead Free)
- Revestimento do componente = Estanho (Lead Free)
- Tamanho da placa/painel = Grande (Maior que 20x20 cm)

Figura 4.4 - Formulário para registro das informações gerais da placa eletrônica

Para desenvolver o módulo de busca por similaridade (Módulo B do SI2PL) foi necessário primeiramente definir o método pelo qual as placas seriam comparadas entre si. Neste caso, optou-se pela utilização do algoritmo *Nearest Neighbor Algorithm* (NNA) [78] ou algoritmo do vizinho mais próximo. O NNA é um dos algoritmos de seleção mais utilizados na aplicação de raciocínio baseado em casos e apresenta as vantagens de fácil programação, adaptabilidade e simplicidade, justificando assim o seu uso.

O NNA é baseado no cálculo de distâncias entre pontos num espaço multidimensional, reduzindo-se ao Teorema de Pitágoras quando o número de dimensões é igual a dois. Matematicamente, é preciso avaliar o valor numérico das distâncias entre o valor alvo em cada produto na base de dados e dividi-las pela maior distância entre dois pontos qualquer dentro da área definida pelos índices. Essas razões numéricas fornecem valores quantitativos da proximidade de cada produto em relação ao alvo. Considerando o valor complemento de cada razão, isto é o valor 1 menos a razão, chegamos a um parâmetro que indica o grau de concordância entre uma possível solução e o valor ideal.

Esse raciocínio pode ser mais bem explicado através das equações que regem o algoritmo. Sejam X e Y dois pontos num espaço de N dimensões:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_N); Y = (y_1, y_2, \dots, y_N) \quad (1)$$

A distância euclidiana entre eles é dada por:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

Portanto, a distância entre um ponto qualquer P e o valor alvo é dada por:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - Alvo_i)^2} \quad (3)$$

A maior distância entre dois pontos contidos nesse espaço n-dimensional é:

$$D_{max} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [\max(n_i) - \min(n_i)]^2} \quad (4)$$

Assim, a concordância para o ponto P é dada por:

$$\text{Concordância} = C = \frac{D_{max} - D}{D_{max}} = 1 - \frac{D}{D_{max}} \quad (5)$$

Quanto menor for a distância D entre o valor atual e valor alvo, maior será o grau de concordância achado para uma solução. A concordância é o melhor estimador do grau de semelhança achado para uma solução.

O algoritmo NNA foi inserido dentro do código do software e os índices de classificação de similaridade foram dispostos de forma configurável. Assim, tornou-se possível inserir e atualizar as informações de comparação conforme as necessidades da empresa em relação à diversidade das placas produzidas.

4.2.2 Planejamento da inspeção

O sub-menu “Planejamento da Inspeção” no software PCBA SmartQuality engloba os módulos C e D do SI2PL, os quais têm a função de estabelecer os planos de controle para serem utilizados na produção. Para isto, foi estabelecido um formulário exclusivo para criação e visualização dos planos de controle (Módulo C do SI2PL) de todos os produtos cadastrados na base de dados. Neste formulário foi incluída uma opção para copiar um plano de controle existente, a qual utiliza o recurso do algoritmo NNA, conforme detalhado no item anterior, para indicar o produto de maior similaridade. Além disso, foi inserido neste formulário uma interface de comunicação com o programa *shell*, a fim de executar a interação do software PCBA SmartQuality com o SE de predição da qualidade (Módulo D

do SI2PL). A Figura 4.5 ilustra o diagrama de Casos de Uso do sub-menu Planejamento da inspeção.

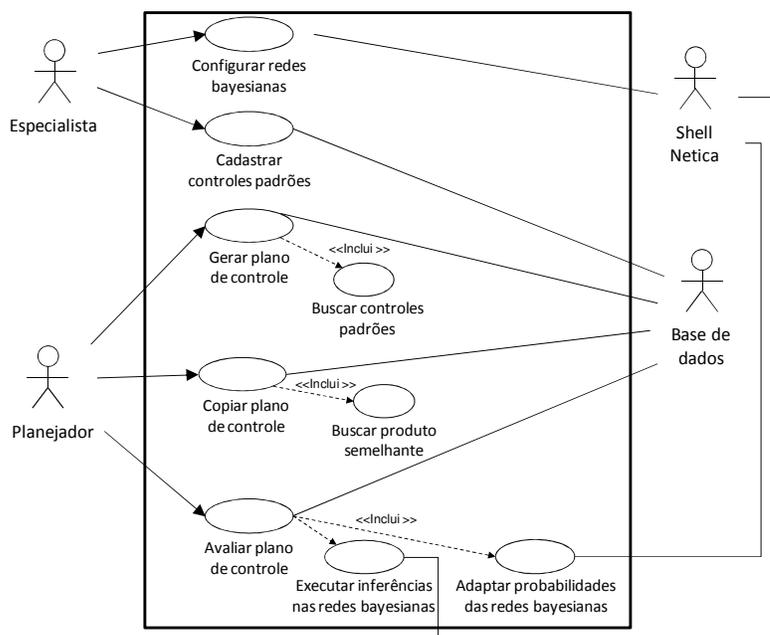


Figura 4.5 - Diagrama de Casos de Uso do sub-menu Planejamento da inspeção

O desenvolvimento da interface entre o PCBA SmartQuality e o *shell* iniciou-se com a escolha do tipo de ferramenta mais apropriada para a criação do SE de predição da qualidade. Neste caso, optou-se em utilizar as redes bayesianas (Figura 5.13). Os motivos que levaram essa escolha foram a simplicidade na forma de representação de conhecimento para a empresa e principalmente o fato das redes bayesianas possuírem a possibilidade de adaptar automaticamente sua base de conhecimento a partir de dados históricos, uma vez que não foram encontradas referências bibliográficas e dificilmente uma empresa dispõe de informações objetivas para a criação da base de conhecimento do SE de predição da qualidade.

As redes bayesianas são esquemas de representação de conhecimentos utilizadas para desenvolver a base de conhecimentos de um SE Probabilístico. Elas possuem uma parte estrutural refletindo relações causais entre as variáveis de entrada (*inputs*) e a variável de saída (*output*) do sistema e valores de probabilidade refletindo a força da relação. As redes bayesianas trabalham com relações causais quantificadas por valores de probabilidade condicional (Teorema de Bayes).

Uma rede bayesiana é um modelo matemático baseado em nós e arcos que representam, respectivamente, as variáveis de um universo $U = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ e a dependência entre estas. A direção dos arcos, em geral, representa relações de causa-

efeito entre as variáveis ^[79]. Por exemplo, se houver um arco indo de um nó A para um nó B (Figura 4.6), assume-se que A representa uma causa de B e adota-se como nomenclatura que A é um dos pais de B; analogamente, B é um dos filhos de A. Associado ao grafo existe uma distribuição de probabilidades.

As redes bayesianas adotam uma representação compacta onde são definidas somente as probabilidades condicionais de cada nó em relação aos seus pais. As redes Bayesianas obedecem à condição de Markov: não existe uma relação de dependência direta entre quaisquer dois nós a não ser que exista um arco entre eles na rede. A distribuição de probabilidade correspondente à rede é calculada a partir destas probabilidades condicionais:

$$P(U) = P(A_1, A_2, \dots, A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i | pa(A_i)), \quad (6)$$

onde $P(U)$ é a probabilidade conjunta para a rede, $pa(A_i)$ são os pais do nó A_i e $P(A_i | pa(A_i))$ são as probabilidades condicionais de A_i em relação aos seus pais.

Cada nó possui um número finito, maior ou igual a dois, de categorias. As categorias, também comumente denominadas de *estados*, representam os possíveis valores da variável representada pelo nó. Um nó é *observado* quando há conhecimento sobre o estado da variável que representa o nó. Os nós observados têm grande importância no processo de inferência realizado na rede, pois, juntamente com as probabilidades condicionais especificadas para a rede, determinam as probabilidades dos nós não observados. As probabilidades condicionais da rede após a inferência são dadas por:

$$P(A_i | E), A_i \in U, \quad (7)$$

ou seja, as probabilidades de cada nó, dado o conjunto de nós observados (E).

No entanto, em aplicações práticas, os valores da probabilidade conjunta $P(U)$ não são muito significativos na análise do problema modelado. De maior interesse são as probabilidades marginais de cada nó não observado. Utilizando-se a probabilidade conjunta, podem-se obter as probabilidades marginais somando-se, para cada estado de cada variável, todas as probabilidades em que a variável encontra-se no estado desejado. Em seguida, normalizam-se as probabilidades obtidas e obtêm-se as probabilidades marginais para cada nó. Esses conceitos são ilustrados a seguir através de um exemplo ^[80].

A Figura 4.6 ilustra uma rede com três nós, denominados A, B e C, antes e após a inserção de uma observação no nó B, bem como as respectivas tabelas de probabilidades para a rede.

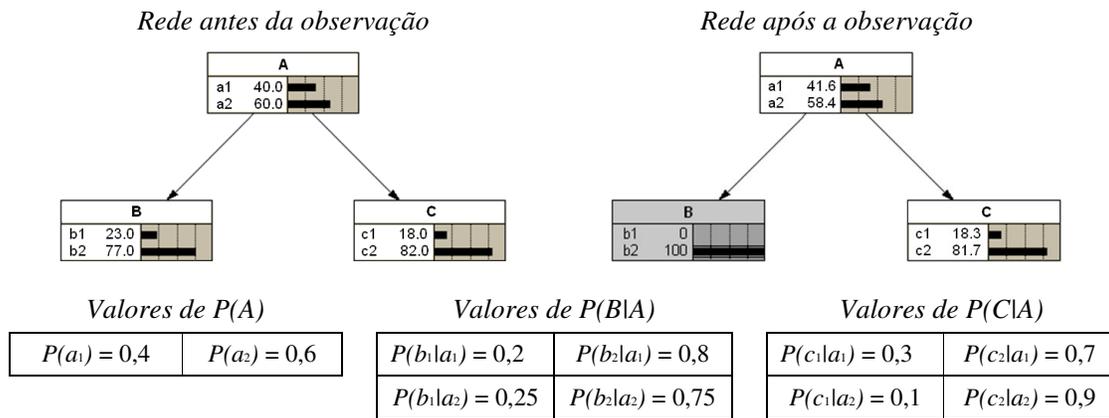


Figura 4.6 - Exemplo de rede bayesiana

A partir das tabelas acima, obtém-se a tabela conjunta $P(A, B, C)$, contendo oito valores, dados por $P(A, B, C) = P(A) * P(B|A) * P(C|A)$:

Tabela 4.1 - Valores de P(A, B, C)

$P(a_1, b_1, c_1) = 0,024$	$P(a_1, b_2, c_1) = 0,096$	$P(a_2, b_1, c_1) = 0,015$	$P(a_2, b_2, c_1) = 0,045$
$P(a_1, b_1, c_2) = 0,056$	$P(a_1, b_2, c_2) = 0,224$	$P(a_2, b_1, c_2) = 0,135$	$P(a_2, b_2, c_2) = 0,405$

Para o caso em que o nó B é observado como $B = b_2$, realiza-se um processo de inferência para os nós A e C. Para $P(a_1|B = b_2)$, por exemplo, realiza-se o seguinte cálculo:

$$P(a_1|B = b_2) = \frac{P(a_1, b_2, c_1) + P(a_1, b_2, c_2)}{P(a_1, b_2, c_1) + P(a_1, b_2, c_2) + P(a_2, b_2, c_1) + P(a_2, b_2, c_2)} \quad (8)$$

Como é observado que $B = b_2$, desta forma, todas as probabilidades em $P(A, B, C)$ contendo b_1 não são utilizadas. Realizando-se o processo acima para todos os estados de A e C, obtém-se as probabilidades condicionais para cada nó, exibidas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Probabilidades condicionais para cada nó

$P(a_1 B = b_2) = 0,416$	$P(c_1 B = b_2) = 0,183$
$P(a_2 B = b_2) = 0,584$	$P(c_2 B = b_2) = 0,817$

O processo de inferência realizado acima é a base da utilidade das redes Bayesianas. No entanto, existem algoritmos mais eficientes em tempo e espaço, que não exigem o cálculo de toda a tabela conjunta^[79]. Quando uma rede bayesiana está ligada a uma base de dados ela torna-se adaptativa e se atualiza conforme as probabilidades estimadas nos dados armazenados, sendo chamadas de redes bayesianas adaptativas.

Outra possibilidade é a capacidade de aprender por meio da alteração de sua topologia, podendo acrescentar ou retirar variáveis da base de conhecimento, sendo chamadas então de redes bayesianas dinâmicas [69], [74]. No PCBA SmartQuality empregam-se as redes bayesianas adaptativas.

Com a definição do tipo de ferramenta, a próxima etapa foi a escolha do software *shell* para ser usado na criação das redes bayesianas e a na interação com o software PCBA SmartQuality. Para isto, realizou-se uma pesquisa de mercado sobre os softwares existentes e através de uma matriz de decisão onde foram ponderados custo, operacionalidade, recursos e compatibilidade, optou-se pelo *shell* Netica criado pela empresa canadense Norsys. No *shell* Netica a parte estrutural das redes bayesianas é criada e a interação e o aprendizado das probabilidades das redes é executada pelo software PCBA SmartQuality através de uma DLL (Biblioteca de ligação dinâmica) disponibilizada pelo *shell* Netica.

A última etapa da estruturação do SE foi definição de como todas estas informações seriam dispostas ao usuário. Estabeleceu-se que cada processo teria sua rede bayesiana específica criada no *shell* Netica (Figura 4.7), sendo que cada nó de entrada dessa rede bayesiana estaria vinculado com um controle padrão cadastrado no software PCBA SmartyQuality (Figura 4.8) e o nó de saída da rede estaria vinculado à qualidade atingida pelo processo medida pelo indicador DPMO In-process, especificado no item 4.2.4, durante a inspeção do produto.

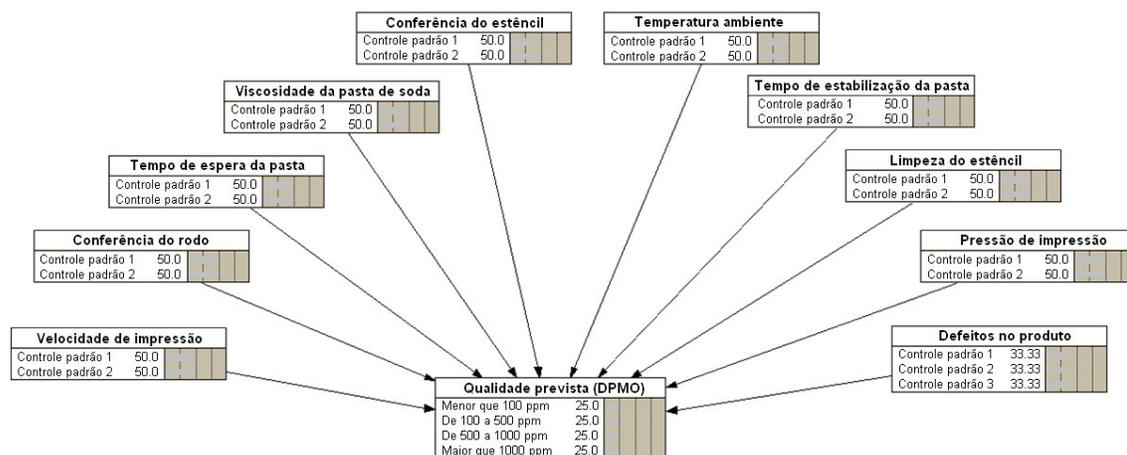


Figura 4.7 - Rede bayesiana aplicada ao processo de aplicação de pasta de solda

Controles padrões

Arquivo Exibir

Processo
 Aplicação de pasta de solda - DEK - 265 GSX

Linha: 1/14 Atualizar plano de controle

Atribuição
 Código: PROC-N01-CP01 Nó da rede bayesiana: Limpeza_Stencil - Sob_controle_padrao_1 Tipo: Produto Processo

Controle
 Descrição da característica: Limpeza do estêncil Caract. especial: Sem nenhuma obstrução Especificação / Faixa de variação: Sem nenhuma obstrução

Técnica de avaliação / Medição: Visual Tamanho da amostra: 1 Freq. da amostra: Cada 4 placas Relatório de controle: Folha de registro de processo

Plano de reação / Observações: Limpar conforme procedimento

Código	Tipo	Característica	Caract. Esp.	Especificação	Técnica avaliação	Tamanho	Frequência	Rel. controle	Plano de reação
PROC-N01	Processo	Limpeza do estêncil		Sem nenhuma	Visual	1	Cada 4 placa	Folha de registro	Limpar conforme procedimento
PROC-N02	Processo	Tempo mínimo do		8 horas	Cronômetro	N/A	Cada nova al	Folha de registro	Aguardar atingir a temperatura ideal
PROC-N03	Processo	Temperatura ambi		21 - 28 °C	Controlador da má	N/A	Diariamente r	Folha de registro	Registrar e comunicar ao suporte té
PROC-N04	Processo	Condições físicas		Não danificad	Visual	N/A	Diariamente,	Folha de registro	Interromper operação e comunicar .
PROC-N05	Processo	Viscosidade da pa		Boa rolagem	Visual	N/A	Cada nova al	Folha de registro	Ajustar conforme procedimento
PROC-N06	Processo	Tempo de espera		1 hora	Cronômetro	N/A	Cada parada	Folha de registro	Remover e recondicionar a pasta d
PROC-N07	Processo	Condições físicas		Não danificad	Visual	N/A	Diariamente,	Folha de registro	Interromper operação e comunicar .
PROC-N08	Processo	Velocidade de imp		60 ml/seg	Controlador da má	N/A	Diariamente,	Folha de registro	Interromper operação e comunicar .
PROC-N09	Processo	Pressão do rodo		9 kg	Controlador da má	N/A	Diariamente,	Folha de registro	Interromper operação e comunicar .
PROD-N01	Produto	Defeitos de aplica		Conforme man	Inspeção visual me	100%	Contínua	Software PCBA	Interromper operação e comunicar .
PROD-N01	Produto	Excesso de pasta		Manual de crit	Inspeção visual me	100%	Contínua	Software PCBA	Interromper operação e comunicar .
PROD-N01	Produto	Falta de pasta de s		Manual de crit	Inspeção visual me	100%	Contínua	Software PCBA	Interromper operação e comunicar .
PROD-N01	Produto	Pasta de solda des		Manual de crit	Inspeção visual me	100%	Contínua	Software PCBA	Interromper operação e comunicar .
PROD-N01	Produto	Pasta de solda bor		Manual de crit	Inspeção visual me	100%	Contínua	Software PCBA	Interromper operação e comunicar .

Fechar

Figura 4.8 - Controles padrões inseridos no software PCBA SmartQuality para o processo de aplicação de pasta de solda

Com esta estruturação estabelecida, o SE é capaz de interagir com o usuário durante a criação do plano de controle, necessitando para isto adaptar previamente sua base de conhecimento com os dados históricos registrados no sub-menu de “Inspeção”, o qual será explorado no próximo item. Também foi desenvolvido um formulário para gerar uma interface mais amigável ao planejador para criar e atualizar o plano de controle para cada tipo de produto. A Figura 4.9 visualiza a disposição estabelecida ao formulário de criação do plano de controle no software PCBA SmartQuality.

Figura 4.9 - Formulário para criação do plano de controle. O SE interage informado a qualidade prevista a partir dos controles padrões selecionados

Neste formulário, na medida em que os controles vão sendo selecionados pelo planejador, ou seja, os nós de entrada da rede bayesiana vão sendo observados, o aplicativo executa as inferências na rede bayesiana e mostra a probabilidade do processo de atingir um determinado índice de qualidade, através do nó de saída da rede. Com isto, o planejador poderá verificar o impacto de cada controle padrão e decidir se deseja inseri-lo ou não no plano de controle. Estes valores vão depender da estruturação da base de conhecimento e do aprendizado dos dados históricos.

4.2.3 Inspeção

O sub-menu “Inspeção” do software PCBA SmartQuality refere-se aos módulos E e F do SI2PL, no qual se executa o registro dos dados de controles e inspeção. Para desenvolver estes módulos foi levado em consideração o fato de que o registro dos dados deveria acontecer de forma otimizada, pois dependeriam de pessoas comprometidas com a produção. Cabe ressaltar neste momento que por uma série de questões não foi implementada a coleta de dados automatizada, porém, percebeu-se que para o

desenvolvimento futuro destes módulos a automação seria extremamente benéfica. A Figura 4.10 ilustra o diagrama de Casos de Uso do sub-menu Inspeção.

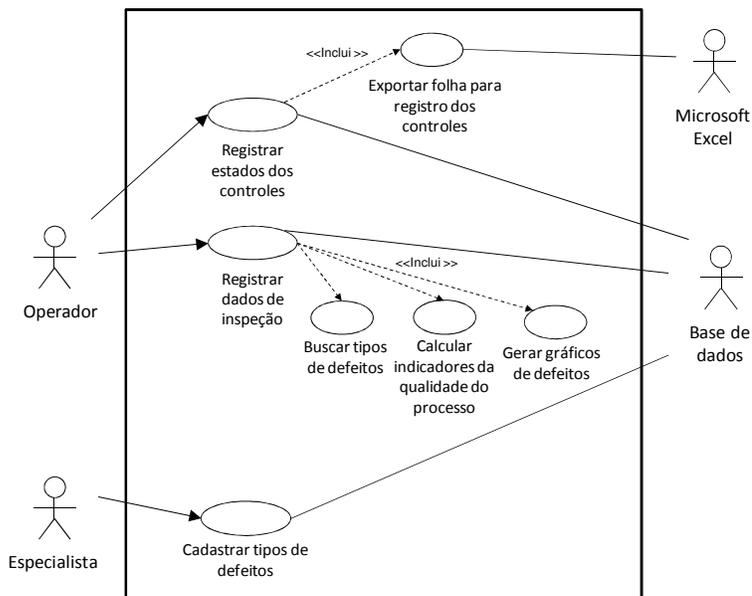


Figura 4.10 - Diagrama de Casos de Uso do sub-menu Inspeção

Para viabilizar a operação do módulo de registro de controle (Módulo E do SI2PL) optou-se por permitir sua execução em dois momentos. No primeiro momento o software PCBA SmartQuality exporta uma folha de registro dos controles (Figura 4.11) para o Microsoft Excel™ de acordo com o plano de controle estabelecido e o responsável por realizar ou auditar os controles deve preencher essa folha durante a produção. Num segundo momento os dados da folha de registro devem ser registrados para um formulário específico do software PCBA SmartQuality (Figura 4.12).

FOLHA DE REGISTRO DE CONTROLE				
PARÂMETROS DE PROCESSO		RESPONSÁVEL PELO CONTROLE e DATA DO CONTROLE		
Nº	Descrição/Descrição	Qualificação do Operador/Qualificação	Local/Local	Data
1	Perfil do forno de refusão	Confirmação das especificações de fabricação	Trabalhar de perfil (Estatística)	
2	Defeitos nas placas de circuito impresso	Manual de controle de qualidade	Inspeção visual manual (MVA)	
3	Defeitos nas placas de circuito impresso	Manual de controle de qualidade	Inspeção óptica automatizada (AOI) - 2D	
4	Defeitos nas placas de circuito impresso	Manual de controle de qualidade	Teste de Circuito (ICT)	
5	Defeitos nas placas de circuito impresso	Manual de controle de qualidade	Teste Funcional (FT)	

Figura 4.11 - Folha para registro manual dos controles

Figura 4.12 - Formulário de registro dos controles

Neste caso, também é possível registrar os dados de controle diretamente no software sem passar pela folha de registro manual. No entanto, torna-se necessário a presença de computadores próximos aos pontos de controle.

Para o desenvolvimento do módulo de inspeção (módulo F do SI2PL) decidiu-se utilizar um leitor de código de barras para tornar a coleta dos dados mais ágil. Para que isto fosse possível, foi criado um formulário para cadastro dos tipos de defeito possíveis de serem encontrados durante a montagem das placas eletrônicas. Em conjunto com este formulário foi gerada uma folha de coleta contendo uma foto ilustrativa e o código de barras para cada defeito (Figura 4.13). Procurou-se desenvolver um formulário único e simples para o registro dos dados de inspeção em qualquer local onde a inspeção aconteça. Neste formulário é inserido o número serial da placa, o código do defeito e o valor de referência do componente onde o defeito foi localizado.

A Figura 4.14 ilustra o formulário para registro dos dados de inspeção no produto. Neste formulário, na medida em que os dados de defeitos vão sendo coletados, um gráfico de barras dos defeitos encontrados é gerado e o indicador da qualidade é calculado.



Figura 4.13 - Folha com possíveis defeitos de serem encontrados

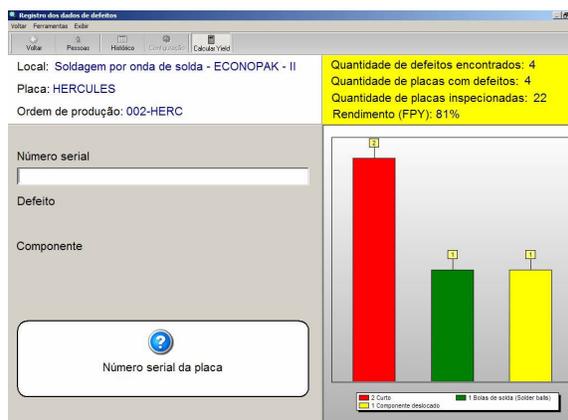


Figura 4.14 - Formulário de registro dos dados de inspeção de produto

Para que a coleta dos dados de inspeção de produto aconteça é necessário que estejam disponíveis nos locais da inspeção um computador com leitor de código de barras e a folha de coleta de defeitos.

4.2.4 Controle dos dados da inspeção

O último sub-menu do software PCBA SmartQuality diz respeito aos módulos G e H do SI2PL no qual possui o sistema para diagnóstico do processo e os indicadores para a

análise da qualidade atingida. A Figura 4.15 ilustra o diagrama de Casos de Uso do sub-menu Introdução do novo produto.

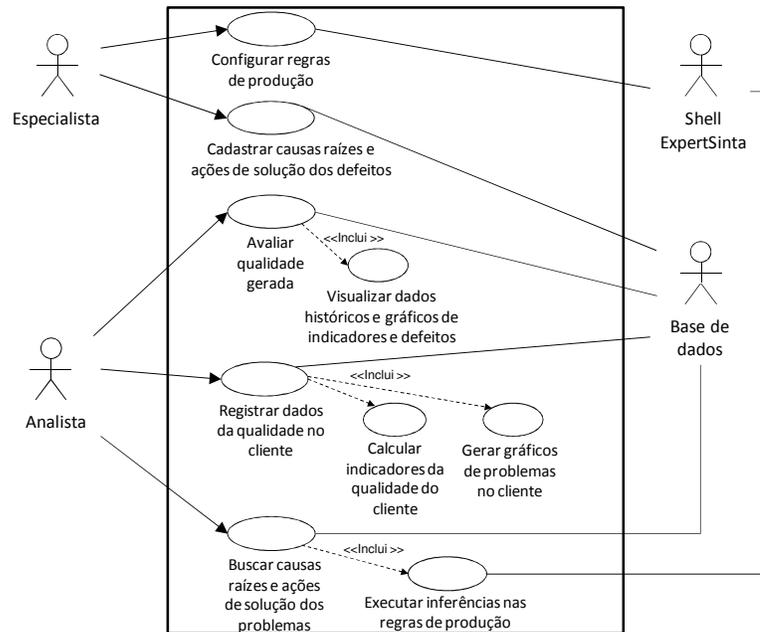


Figura 4.15 - Diagrama de Casos de Uso do sub-menu Controle dos dados da inspeção

Da mesma forma que aconteceu com os outros SE's contido no software PCBA SmartQuality, para criar a estruturação do SE de diagnóstico do processo (módulo G do SI2PL) foi necessário primeiramente definir qual o tipo de ferramenta mais apropriada. Neste caso, as redes bayesianas também poderiam ser utilizadas, entretanto, optou-se pela ferramenta baseada em regras de produção. O motivo principal que levou essa escolha foi o fato de já existir informação suficiente, tanto em bibliografias, tais como: [84], [92], como através de especialistas nas empresas, para se construir a base de conhecimento do SE de diagnóstico.

Das diversas representações que existem para a criação de bases de conhecimento, as regras de realização são as mais comuns. São simplesmente um conjunto de regras no estilo SE... ENTÃO..., com a possibilidade de inclusão de conectivos lógicos relacionando os atributos no escopo da base, como vemos no exemplo a seguir:

SE Aplicação do fluxo = Adequada
E Propriedades do fluxo <> Adequadas
ENTÃO Causa = Fluxo contaminado CNF 90%
 Causa = Baixa atividade do fluxo CNF 65%

As regras de produção são populares por possuírem as seguintes vantagens [68], [72].

- Modularidade: cada regra, por si mesma, pode ser considerada como uma peça de conhecimento independente;
- Facilidade de edição (uma consequência da modularidade): novas regras podem ser acrescentadas e antigas podem ser modificadas com relativa independência;
- Transparência do sistema: garante maior legibilidade da base de conhecimentos.

A modularidade de um sistema baseado nessa arquitetura permite a construção passo-a-passo da base de conhecimentos, ou seja, é possível realizar vários testes com apenas um subconjunto de regras concluído. Novas regras podem ser facilmente inseridas na base de conhecimento, porém, a consistência deve ser mantida. Obviamente, sabe-se que menos regras implicam geralmente em um menor número de casos abrangidos.

Assim sendo, entendeu-se que as regras de produção seriam a melhor opção para modelar e sistematizar o conhecimento dos especialistas da empresa no diagnóstico do processo. No entanto, ficou evidente que a base de conhecimento contendo as regras de produção necessita ser uma base dinâmica, sendo atualizada sempre que houver necessidade, uma vez que devem ser priorizadas as causas que possuem maior probabilidade de gerar um determinado defeito, sendo que estas causas podem variar ao longo tempo.

Com a definição do uso da ferramenta baseada em regras foi decidido o uso do *shell* Expert Sinta para ser integrado no software PCBA SmartQuality. Expert SINTA é um *shell*, de código fonte aberto e uso liberado, desenvolvido pela Universidade Federal do Ceará. Este *shell* utiliza um modelo de representação do conhecimento baseado em regras de produção e tratamento probabilístico, com possibilidades de construção de telas automáticas, menus e textos explicativos, tendo a vantagem de possuir uma interface amigável. No *shell* Expert Sinta é criada toda a base de conhecimento com as regras de produção para cada tipo de defeito, sendo que a execução dessas regras é realizado pelo software PCBA SmartQuality, através de um componente do *shell* Expert Sinta inserido no código do software.

A Figura 4.16 ilustra a interface mostrada pelo software PCBA SmartQuality durante uma consulta ao SE de diagnóstico de defeitos.

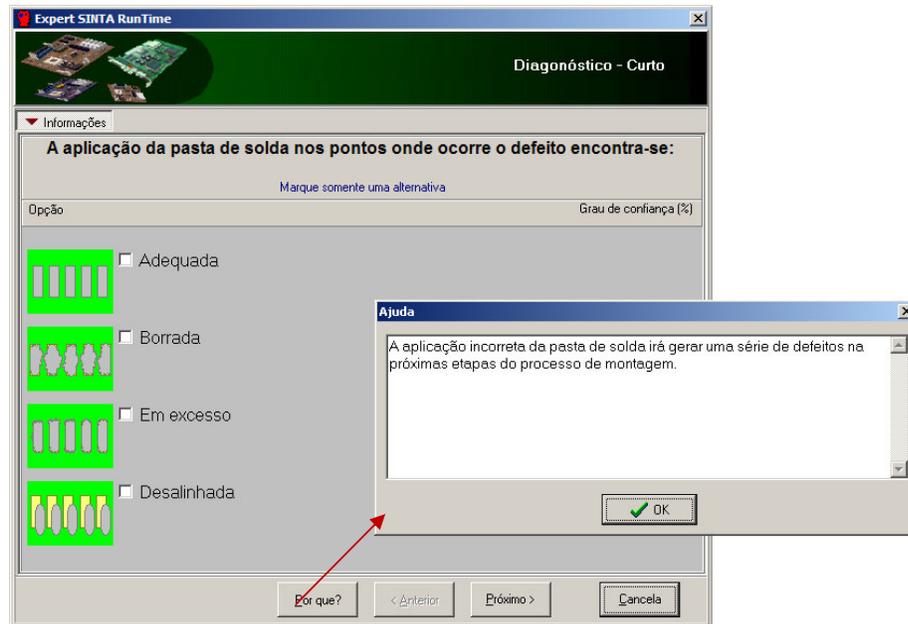


Figura 4.16 – Interface do SE para diagnóstico de defeitos

Por fim, a construção do módulo de indicadores (Módulo H do SI2PL) dependeu da definição dos indicadores mais apropriados ao processo de montagem de placas eletrônicas, além daqueles indicadores que são exigidos pelos clientes.

Ficou estabelecido considerar no software PCBA SmartQuality os seguintes indicadores da qualidade do processo:

- FPY (Rendimento da montagem) – é o número de placas aceitas na primeira vez pela inspeção/teste dividido pelo número de placas inspecionadas/testadas;
- DPMO End-Item ^[86] (Defeitos por Milhão de Oportunidades do Produto Final) - é o número de defeitos por placa dividido pelo número de oportunidades de defeitos da placa, multiplicado por um milhão;
- DPMO In-Process ^[87] (Defeitos por Milhão de Oportunidades no Processo) - é o número de defeitos gerados por um determinado processo na placa dividido pelo número de oportunidades de defeitos deste processo, multiplicado por um milhão;
- DPU (Número de defeitos médio por unidade) - é o número total de defeitos detectados dividido pelo número de placas inspecionadas.

Todos esses indicadores são calculados a partir dos mesmos dados de inspeção. No entanto, para calcular os indicadores de DPMO é necessária uma configuração prévia das oportunidades de defeitos da placa e dos processos. Dentre estes indicadores, somente o

FPY é calculado de forma *on-line*, os demais são calculados somente no final do lote. Neste caso, o indicador FPY é utilizado como um indicador de controle do processo, sendo que uma ação deve ser tomada caso este esteja fora dos limites estabelecidos.

Com relação aos indicadores de defeitos após liberação do lote para o cliente foram agregados os seguintes:

- Quantidade de reclamações – número de reclamações feitas pelo cliente;
- Índice de lotes com devolução – Total de lotes com devolução dividido pelo total de lotes entregues;
- Índice de placas devolvidas – Total de devoluções dividido pelo total de placas entregues.

Os dados para cálculo destes indicadores são gerados de acordo com o retorno do cliente.

Para todos os indicadores da qualidade, tanto no processo como no cliente, foi criado um formulário para visualização de gráfica. A Figura 4.17 ilustra um exemplo de como formulário apresentam de forma gráfica os valores do indicador DPMO In-Process obtidos na produção de uma determinada placa eletrônica.

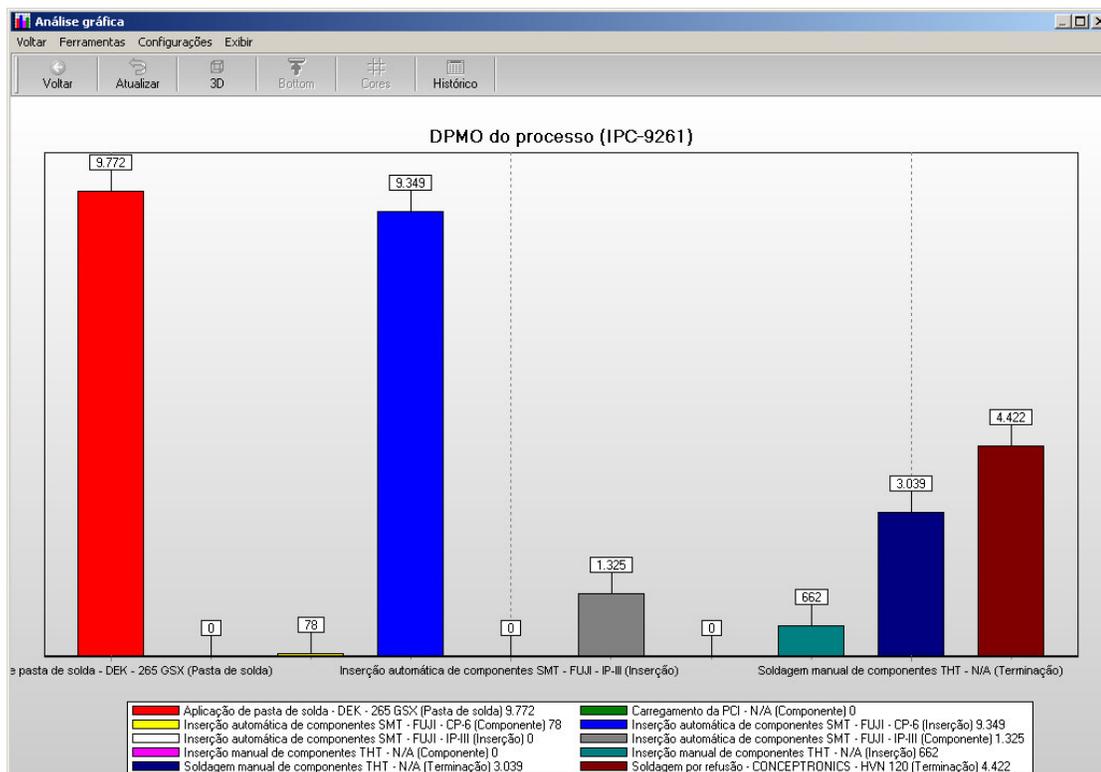


Figura 4.17 - Formulário para visualização gráfica dos indicadores da qualidade

Neste formulário foi criada uma série de filtros capazes de selecionar e juntar dados de diferentes produtos, processos, ordens de produção, entre outros, para facilitar a análise gráfica das informações.

Destaca-se que, por questões de viabilidade de implantação, não foi estruturado no software PCBA SmartQuality nenhum mecanismo automático capaz de realimentar a qualidade vista pelo cliente, restringindo-se apenas em realimentar automaticamente os dados de inspeção obtidos durante a produção. Esta limitação reduziu a capacidade do PCBA SmartQuality em criar um segundo laço automático de aprendizado no qual é possível verificar se os dados de inspeção estão retratando a qualidade real dos produtos produzidos ou se esta qualidade está sendo desvirtuada. A partir dessa informação, pode ser avaliado com um maior grau de confiança se o plano de controle está adequado ou não. Portanto, na estrutura do aplicativo criada neste trabalho cabe ao planejador avaliar os indicadores da qualidade no cliente registrados em sua base de qualidade e ajustar, caso necessário, os planos de controle segundo o resultado destes indicadores.

5 ESTUDO DE CASO - IMPLANTAÇÃO DO SI2PL NO LABELECTRON

Após o desenvolvimento do aplicativo PCBA SmartQuality baseado no modelo SI2PL realizou-se um estudo de caso para analisar sua aplicabilidade e efetividade num ambiente fabril. Neste capítulo serão explorados o processo de implantação do aplicativo PCBA SmartQuality numa empresa montadora de placas eletrônicas em pequenos lotes e os principais resultados obtidos com sua aplicação.

5.1 A EMPRESA

O estudo de caso foi realizado nas dependências do LABelectron (Laboratório de Desenvolvimento e Testes de Processos e Produtos Eletrônicos). O LABelectron é um laboratório-fábrica (Figura 5.1) que preconiza um modelo de sistema produtivo em pequenos lotes, reunindo dois elementos centrais: uma planta fabril em operação contínua e um Consórcio Tecnológico.

As atividades de manufatura eletrônica, lotes piloto, pré-séries e prototipagem de placas eletrônicas são realizadas por duas empresas especializadas na montagem de placas eletrônicas, Produza S/A e Megaflex Sul, sendo elas responsáveis pela operação da planta industrial. As atividades do Consórcio Tecnológico caracterizam-se como projetos de pesquisa, de desenvolvimento e de aplicação, capacitação na forma de seminários, cursos, *workshops* e visitas técnicas.



Figura 5.1 - Detalhes da planta do LABelectron

O LABelectron realiza a montagem de placas eletrônicas com tecnologia SMT e THT, com capacidade para montagem de até 18 milhões de componentes/mês. Atualmente

o LABelectron presta serviços para 47 clientes, totalizando cerca de 100 tipos variados de placas. Os pedidos de produção dos produtos dos clientes variam desde 5 até 500 placas por lote, sendo que a produção pode acontecer em lotes periódicos ou numa única vez.

Pelo fato do LABelectron lidar com uma grande variedade de produtos, nos quais a maioria destes é produzida em baixo volume e num curto tempo de produção, seu sistema de garantia da qualidade depara-se com todos os problemas da qualidade abordados como foco de atuação desta tese. Estes problemas estão fortemente evidenciados na empresa, também pelo fato de ser ela uma prestadora de serviços cujo desenvolvimento e a integração das placas eletrônicas, em sua grande maioria, são executados pelos seus clientes. Isto torna a captura de informações, a tomada de ações e o conhecimento da qualidade gerada ainda mais complicado e lento de ser realizado.

A seguir é feito um detalhamento de como se procedeu à implantação do PCBA SmartQuality no LABelectron a partir de quatro fatores considerados fundamentais neste processo: infra-estrutura, cadastro das informações, desenvolvimento da base de conhecimento dos SE's e treinamentos. Este processo aconteceu de forma gradativa, levando cerca de um ano para ser realizado. Durante esse período foram realizadas em paralelo testes e adequações no código fonte do software PCBA SmartQuality.

5.2 INFRA-ESTRUTURA

Quando se iniciou a implantação do PCBA SmartQuality, a empresa já dispunha de um servidor ligado em rede aos computadores das diversas áreas: engenharia, administrativa, gerencial, etc. Porém, não existiam computadores e infra-estrutura de rede para o chão de fábrica. Deste modo, para que a coleta dos dados de inspeção fosse possível foi necessário instalar novos computadores no chão de fábrica.

Os computadores foram instalados em momentos diferentes. No primeiro momento foi inserido um computador junto à máquina de inspeção óptica automática (AOI), em seguida um próximo ao teste elétrico (ICT) e finalmente foram instalados mais três computadores. Dois juntos aos postos de testes funcionais e reparos e um próximo a inspeção manual visual final e auditoria de produto acabado. Todos esses computadores foram ligados em rede com o servidor e equipados com leitores de código de barras (Figura 5.2).

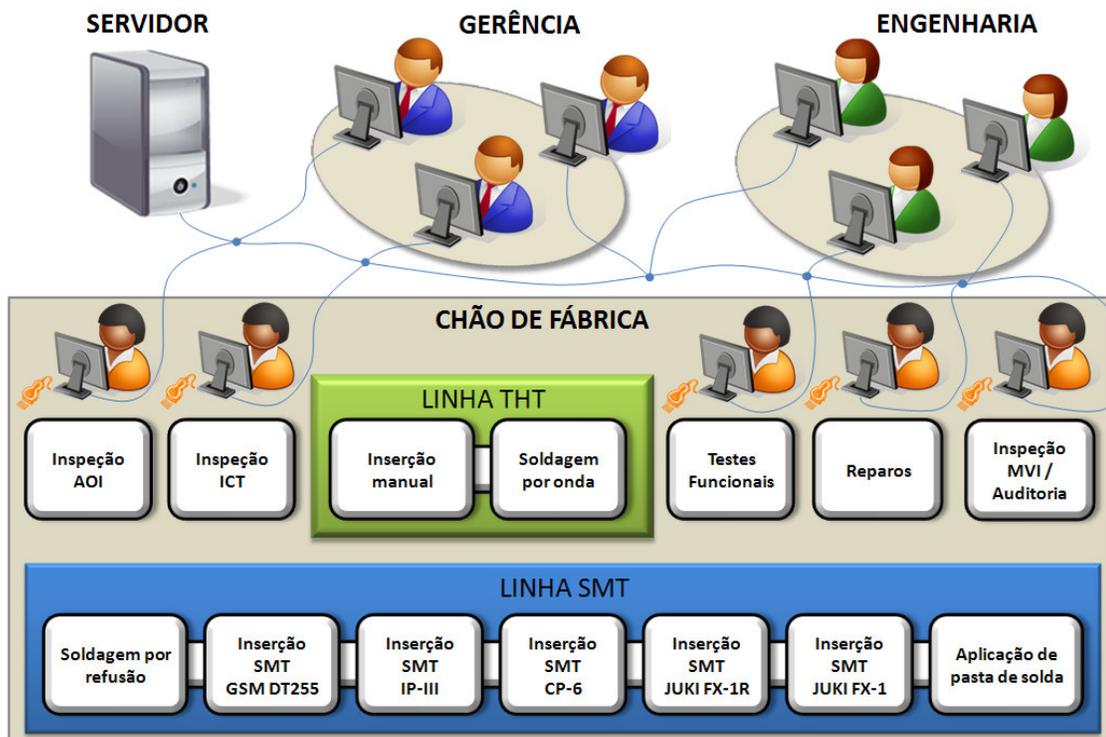


Figura 5.2 – Infra-estrutura utilizada para instalação e operação do software PCBA SmartQuality no LABelectron

O software PCBA SmartQuality e os outros componentes que o complementam (Firebird, ExpertSinta e Netica) foram instalados no computador do servidor e o administrador da base de dados Firebird nos demais computadores, de acordo com arquitetura apresentada no item 4.2. Deste modo, através de um acesso (atalho), o software PCBA SmartQuality ficou disponível para os vários setores da empresa, incluindo o nível operacional e condução dos processos, nível de planejamento e controle da qualidade e nível administrativo.

Para evitar erros operacionais e perdas de informações, foram criadas senhas de acesso à base de dados do programa Firebird com quatro níveis de prioridade: Especialista, Planejador, Analista e Operador. Dependendo do tipo de prioridade acessado, o usuário tem mais ou menos restrições para inserir ou apagar informações na base de dados, entretanto, a consulta é disponível para todos os níveis de prioridade.

A Figura 5.3 ilustra o software PCBA SmartQuality sendo executado em um computador na linha de produção junto ao posto de inspeção manual visual.



Figura 5.3 - Posto para coleta dos dados de inspeção operacionalizado no chão de fábrica

5.3 CADASTRO DAS INFORMAÇÕES

O cadastro das informações foi uma das grandes dificuldades encontradas, motivo pelo qual o processo de implantação se alongou mais do que o esperado. Pelo fato de envolver pessoas dos diversos setores, o preenchimento das informações foi iniciado pelo autor deste trabalho e repassado progressivamente aos responsáveis através de treinamentos.

O cadastro das informações iniciou-se com os dados relacionados ao produto. Foram inseridas as informações específicas de cada placa eletrônica (Vide item 4.2.1) na medida em que novas ordens de produção eram demandadas. Durante este processo notou-se que algumas informações requeridas pelo software PCBA SmartQuality frequentemente não eram enviadas de maneira adequada pelo cliente, causando atrasos no registro dos dados. Ficou evidenciado que esta falta de informações também afetava o tempo de *setup* das máquinas. Por conseguinte, a empresa criou procedimentos internos para solicitar ao cliente a documentação mínima necessária para que a placa eletrônica pudesse ser montada de forma ágil.

Com as informações referentes às placas registradas na base de dados, executaram-se algumas simulações de cadastro dos dados de inspeção e controle, a fim de verificar a operacionalidade do software durante a produção. Verificou-se neste caso que o registro dos dados ocorreu de forma simples e rápida e não tinha riscos de gerar um

gargalo durante a produção. No entanto, a coleta efetiva executada pelos operadores e inspetores só teve início após a definição dos planos de controles, do cadastro dos tipos de defeitos e dos treinamentos.

O cadastro das demais informações necessárias para que o software PCBA SmartQuality pudesse ser operacionalizado estava diretamente vinculado as bases de conhecimento dos SE's e serão detalhadas nos itens seguintes.

5.4 SE DE DIAGNÓSTICO DO PROCESSO

O SE de diagnóstico do processo foi o primeiro a ser elaborado. Para isto, o autor executou um levantamento, baseado em referências bibliográficas ^{[84], [92]} e informações empíricas dos especialistas da empresa, dos possíveis defeitos de serem gerados durante o processo de montagem de placas eletrônicas e as principais causas potenciais desses defeitos. Esse estudo foi sintetizado em duas matrizes de diagnóstico de defeitos, uma para o processo de montagem com tecnologia SMT e outra para o processo de tecnologia THT (Tabela 5.1).

Essas matrizes foram disponibilizadas à empresa para serem usadas como um documento dinâmico, atualizadas cada vez que novas lições foram aprendidas ou quando existirem novos processos.

Nesta atividade constatou-se que existe uma relação ampla e complexa de causa e efeito, porém, limitada e comum aos diversos modelos de máquinas e fabricantes. Os defeitos são provocados por diferentes causas que podem estar relacionadas com as diversas operações de montagem, com os materiais e insumos ou até mesmo com as especificações do produto. Assim sendo, a proposta do SI2PL em disponibilizar um SE para auxiliar no diagnóstico dos diferentes tipos de defeitos foi extremamente válida para o processo de montagem de placas eletrônicas em pequenos lotes, pois encontrar a causa do defeito para que ações sejam tomadas em tempo nem sempre é uma tarefa trivial.

As matrizes de diagnósticos foram elaboradas para facilitar a construção do SE de diagnóstico do processo. Com essas matrizes tornou-se possível verificar o impacto de cada causa sobre os diversos tipos de defeitos e, com isso, criar as regras de produção para que o SE oriente o usuário a encontrar as causas mais prováveis.

Tabela 5.1 - Matriz de diagnóstico de defeitos (Soldagem por máquina de solda onda - Liga de solda com chumbo - Fluxo No-clean)

Causa	Aplicadora de adesivo				Insersoras de componentes SMT				Cura do adesivo				Insersoras de componentes THT				Máquina de solda por onda																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38					
Causa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38					
Soldabilidade inadequada dos componentes ou placa	1																							3	3	2	1	2	3	3	2	1											
Deflexão excessiva da placa de circuito impresso	2	1	2	2	1	2				2	2	2	2	2	2				1					3	3	2	2	2	3	3	2	1											
Máscara de solda sobressalente	3	2								3														3	3	2	2																
Máscara de solda desalinhada	4																							2	2	2		1			1												
Placa de circuito impresso suja	5	1	1	1	2					1	1	2	1											3	3	1		3															
Fabricação imprópria da placa de circuito impresso	6	1	1	1	1					1	1	1	1											2	2	1		1															
Fabricação imprópria do componente	7									2	2	3		3										1	1									3	2	3							
Implantação incorreta do furo	8																							3																			
Relação furo-terminal grande	9																							3																			
Relação furo-terminal pequena	10																							3																			
Pad de solda muito próximo	11																							3																			
Orientação dos comp. transversal a direção da onda	12																							2	3	3	3																
Distância muito próxima entre componentes	13																							2	3	3	3																
Adesivo desalinhado	14					2						2												3																			
Excesso de adesivo	15																							3																			
Falta ou insuficiência de adesivo	16																							3																			
Cordão ou cauda de adesivo	17																							2	2																		
Programação incorreta da coordenada do componente	18																							2	2																		
Sistema de fixação da placa ineficiente	19																							2																			
Pouca aderência do adesivo	20				1																			2																			
Presença de ar na seringa do adesivo	21				2																			2																			
Viscosidade incorreta do adesivo	22				3																			3																			
Tempo incorreto de aplicação	23				3																			3																			
Pressão incorreta de aplicação	24				3																			3																			
Abertura incorreta do bocal	25				3																			3																			
Atura incorreta do limite mecânico do bocal	26				2																			2																			
Bocal entupido	27				3																			3																			
Funcionamento inadequado da aplicadora de adesivo	28				3																			3	3	3	2	2															
Insersoras de componentes SMT																																											
Inserção desalinhada do componente	29																							1	3	2	1																
Programação incorreta	30																																										
Alimentação incorreta do componente	31																																										
Posição incorreta do componente na embalagem	32																																										
Sistema de fixação da placa ineficiente	33																																										
Pressão alta de inserção	34																																										
Pressão baixa de inserção	35																																										
Velocidade alta de inserção	36																																										
Equalização do vácuo de ar (blow-off) alta	37																																										
Equalização do vácuo de ar (blow-off) baixo	38																																										
Tipo de bocal (nozzle) incorreto	39																																										
Funcionamento inadequado das insers. comp. SMT	40																																										
Taxa de aquecimento alta	41																																										
Funcionamento inadequado do forno de refusão	42																																										
Insersoras de componentes THT																																											
Programação incorreta	43																																										
Alimentação incorreta do componente	44																																										
Posição incorreta do componente na fita	45																																										
Terminal do componente não aparente	46																																										
Terminal do componente longo	47																																										
Funcionamento inadequado da insers.de comp. THT	48																																										
Soldagem por onda																																											
Baixa atividade do fluxo (Quantidade de sólidos)	49																							2	2	1																	
Fluxo contaminado	50																							2	2	2	1	3	3	2	3	2											
Aplicação incorreta de fluxo	51																							2	2	3	3	1	3	2	2	2											
Velocidade alta da esteira	52																							2	2	3	2	2	2	2	2	2											
Velocidade baixa da esteira	53																							2	2	3	2	2	2	2	2	2											
Ângulo grande da esteira	54																							3	2	2	1	2	2														
Ângulo pequeno da esteira	55																							2	3																		
Temperatura alta de pré-aquecimento	56</																																										

software PCBA SmartQuality carrega o conjunto de regras de produção específicas daquele defeito e executa o SE através de um componente do *shell* Expert Sinta.

Inicialmente foram criadas pelo autor as regras de produção para alguns tipos de defeitos. Estas regras foram apresentadas e testadas pela equipe da engenharia e, a partir daí, foi repassada para essa equipe a responsabilidade de criar e gerenciar as regras de produção para todos os tipos de defeitos.

As figuras 5.4 a 5.9 ilustram um exemplo de como o SE, utilizando o *shell* Expert Sinta e a regras de produção indicadas no Apêndice 1, interage com o usuário para encontrar as causas mais prováveis que estão gerando o tipo de defeito “curto” (ponte de solda) após a operação de soldagem pela máquina de solda onda. Neste exemplo, o SE investiga a primeira causa mais provável, que neste caso é a aplicação inadequada do fluxo. Caso esta seja descartada, investiga a segunda causa mais provável, que são as propriedades do fluxo. Se também não for o caso, investiga a terceira causa provável, depois a quarta e assim por diante.

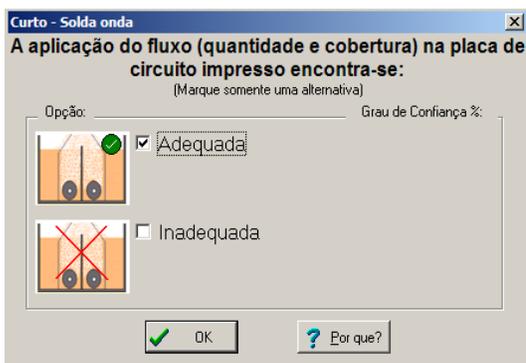


Figura 5.4 – 1ª pergunta do SE

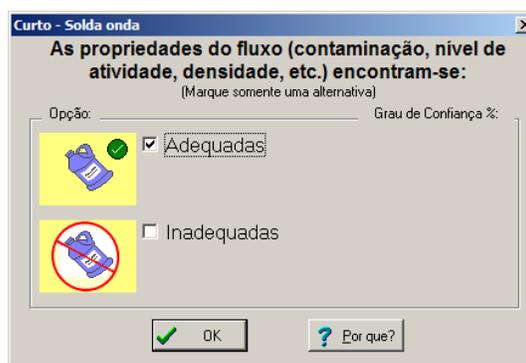


Figura 5.5 – 2ª pergunta do SE

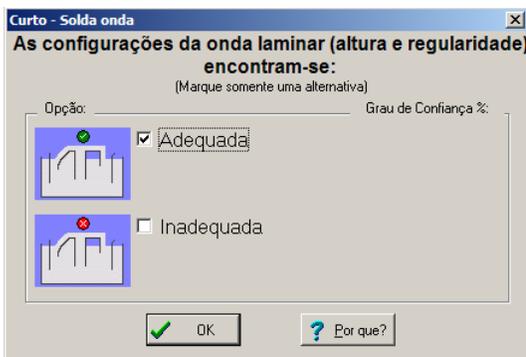


Figura 5.6 – 3ª pergunta do SE

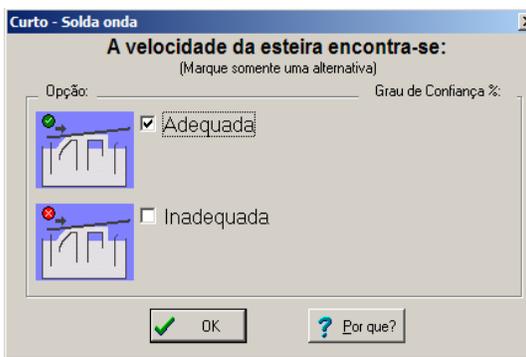


Figura 5.7 – 4ª pergunta do SE

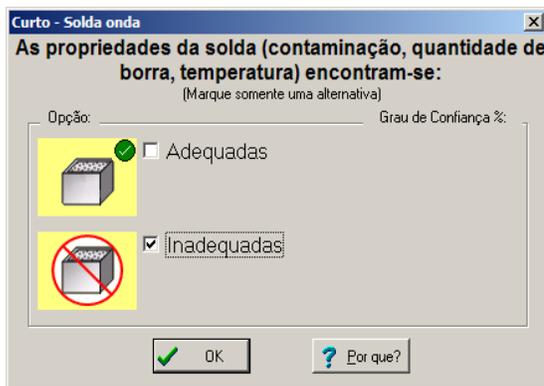


Figura 5.8 – 5ª pergunta do SE

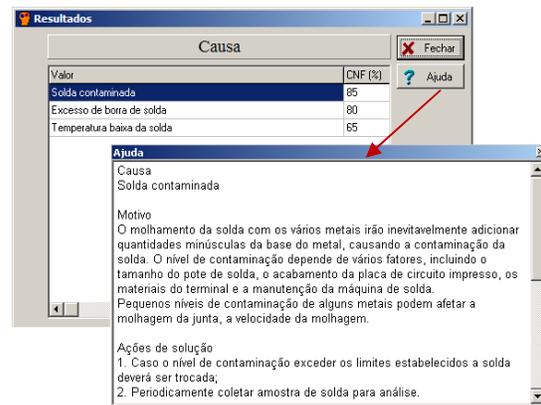


Figura 5.9 – Resultados do SE

Como o motor de inferência do SE utiliza um encadeamento reverso, a seqüência das perguntas executadas pelo SE e os resultados obtidos vão depender da combinação das respostas preenchidas pelo usuário. Nesse caso, as respostas do usuário levaram o SE encontrar os seguintes resultados: solda contaminada, excesso de borra de solda e temperatura baixa da solda, que são as causas raízes mais prováveis que estão gerando defeitos do tipo curto após a soldagem pela máquina de solda por onda. Além disso, o SE é capaz de informar as ações necessárias para corrigir o problema o mais rápido possível. E, finalmente, uma vez descoberta a causa raiz do defeito, a mesma pode ser registrada na base de dados do software PCBA SmartQuality, a fim de se gerar um histórico das causas para ser usado no âmbito da melhoria contínua.

5.5 SE DE BUSCA POR SIMILARIDADE

A segunda base de conhecimento desenvolvida foi a do SE de busca por similaridade. Para que a busca por produtos similares fosse possível foi preciso definir quais características particulares dos diversos produtos seriam usadas na comparação. Foi feita uma análise pelo autor em conjunto com os especialistas da empresa das principais características das placas eletrônicas que poderiam influenciar fatores como: os resultados da qualidade do produto, o fluxograma do processo de montagem, a definição dos controles padrões, a seleção dos sistemas de inspeção, etc. Em seguida, definiram-se os índices de classificação para serem usados pelo algoritmo NNA no cálculo de proximidade entre placas cadastradas. Neste apontamento, as características julgadas essenciais estão apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Tipos de características usadas na comparação das placas eletrônicas

Nº	Características	Peso	Índices	Comentários
01	Componente BGA	Alto	0 - Não possui 6 - Possui	Componente SMT cujas terminações são dispostas em forma de matriz de bolas (BGA - Ball Grid Array)
02	Componente Chip	Baixo	0 - Não possui 3 - Possui	Componente SMT pequeno geralmente de formato retangular
03	Componente Finepitch	Médio	0 - Não possui 4 - Possui	Componente SMT cuja distância entre terminais é pequena
04	Densidade de componentes	Baixo	0 - Baixa 1,5 - Média 3 - Alta	Quantidade de componentes pela dimensão da placa
05	Furo da placa	Baixo	0 - Não revestido 2,4 - Revestido (PTH) 3 - Não possui	Revestimento do furo para a soldagem dos componentes de tecnologia THT
06	Liga de solda	Alto	0 - Com Chumbo 8 - Sem chumbo (Lead free)	Tipo de material usado na soldagem dos componentes na placa
07	Montagem	Baixo	0 - THT Top 2 - THT Top e SMT Bottom 2 - SMT/THT Top 2 - SMT/THT Top e SMT Bottom 2,4 - SMT/THT Top e SMT/THT Bottom 3,2 - SMT Top e Bottom 4 - SMT Top	Tecnologia de montagem por lado da placa. Define o fluxo de montagem da placa no processo
08	Máscara de solda	Médio	0 - Não possui 5 - Possui	Material usado para limitar a solda dentro das ilhas (pads) da placa
09	Pontos de testes	Baixo	0 - Baixo (menos de 30%) 0,5 - Médio (de 30% até 70%) 1 - Alto (mais de 70%)	Quantidade de pontos de testes existentes na placa
10	Projeto da placa	Alto	0 - Não adequado 9 - Adequado	Projeto físico da placa eletrônica (Dimensões das ilhas, orientação dos componentes, etc.)
11	Projeto do estêncil	Alto	8 - Não adequado 0 - Adequado 0 - Não possui	Chapa de metal perfurada de acordo com as posições e dimensões das ilhas (pads) da placa para ser utilizada no processo de aplicação de pasta de solda
12	Revestimento da placa	Alto	0 - Com Chumbo 7 - Sem chumbo (Lead free)	Tipo de material usado no revestimento das ilhas (pads) da placa
13	Revestimento dos componentes	Alto	0 - Com Chumbo 7 - Sem chumbo (Lead free)	Tipo de material usado no revestimento dos terminais do componente
14	Tamanho da placa/painel	Baixo	0 - Pequena (menor que 5x5 cm) 0,5 - Média (de 5x5 até 20x20 cm) 1 - Grande (maior que 20x20 cm)	Dimensões físicas da placa/painel

Foi definido um valor máximo de 10 entre os índices de cada característica. Para as características que geram maior impacto na comparação entre as placas eletrônicas foram definidos intervalos maiores entre os índices, já para aquelas que não afetam muito nos resultados foram atribuídos índices com intervalos menores. Desta forma, criou-se uma

ponderação entre as diversas características estipuladas para definir o nível de similaridade entre as placas.

Todas estas características com seus respectivos índices foram configuradas no software PCBA SmartQuality (Figura 5.10). Estes índices são atribuídos de acordo com as particularidades de cada placa eletrônica no cadastro de informações gerais da placa durante a introdução de um novo produto.

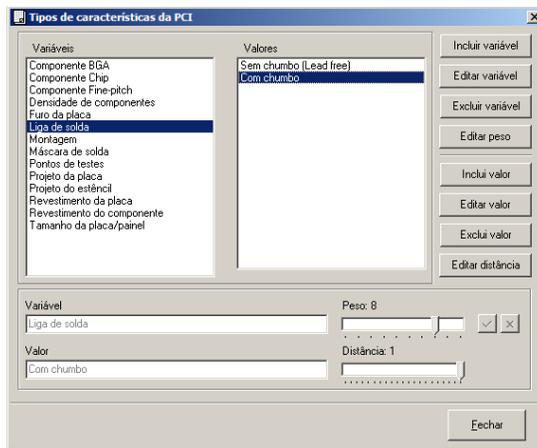


Figura 5.10 - Configuração das características e os índices de comparação no software PCBA SmartQuality

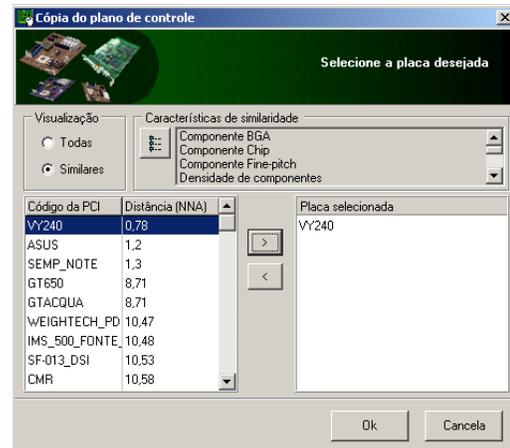


Figura 5.11 - Resultado obtido pelo software PCBA SmartQuality durante uma consulta de similaridade

Assim, quando o software executa uma busca de produtos similares, o algoritmo NNA calcula a distância entre os índices de comparação e gera como resposta o valor de proximidade entre o produto alvo e os demais produtos cadastrados na base de dados (Figura 5.11).

5.6 SE DE PREDIÇÃO DA QUALIDADE

Pelo fato de sua base de conhecimento necessitar dos dados de inspeção e controle, o SE de predição da qualidade foi o último a ser explorado. Seu desenvolvimento só teve início após a instalação dos computadores no chão de fábrica e do treinamento dos operadores na coleta de dados. A base de conhecimento deste SE foi a mais demorada para ser desenvolvida. O período compreendido entre o início de construção da base de conhecimento até a validação e divulgação dos resultados para a empresa durou cerca de seis meses.

A construção piloto da base de conhecimento do SE de predição da qualidade contou com três responsáveis diretos: o autor deste trabalho e dois engenheiros

responsáveis pela qualidade e produção do LABelectron, além de vários participantes: operadores e inspetores responsáveis pela execução dos controles dos processos e das inspeções.

A primeira atividade na construção da base de conhecimento foi a definição dos controles padrões e a estruturação das redes bayesianas. Essa atividade levou certo tempo para ser concluída, pois a empresa não dispunha dos planos de controle para os diferentes tipos de produtos. Foi necessário fazer várias interações com os operadores e responsáveis pela produção para obter essas informações. Ao final dessa atividade foi instituído um conjunto de controles padrões para as características de processo e produto nas diferentes operações de montagem do processo SMT.

Conforme procedimento descrito no item 4.2.2, os controles padrões foram registrados no software PCBA SmartQuality separados por operação. Em seguida, foram construídas no *shell* Netica as redes bayesianas de cada operação de montagem SMT. Para cada nó de entrada das redes bayesianas foi vinculado um controle padrão específico e para o nó de saída foi vinculada à qualidade atingida naquela operação, medida pelo indicador DPMO In-process.

Com a parte estrutural das redes bayesianas estabelecida e os controles padrões definidos, a segunda atividade consistiu no aprendizado das probabilidades das redes a partir dos dados históricos obtidos. Por se tratar de uma base de conhecimento ampla, tomou-se a decisão de restringir sua construção somente para as operações de inserção de componentes SMT, pois eram as mais críticas naquele momento, e mais adiante estender a atividade para as demais operações do processo SMT e para o processo de tecnologia THT.

Nesta etapa foram coletados dados de controles e qualidade atingida durante um período de dois meses, utilizando os formulários do menu Inspeção no software PCBA SmartQuality que foram detalhados no item 4.2.3. Neste período foram produzidos oito modelos de placas diferentes, sendo que três modelos eram muito similares. Durante a produção destas placas os planos de controles sofreram algumas alterações de lote para lote.

A partir dos dados coletados foi realizado o aprendizado das redes bayesianas. Este processo de aprendizado foi executado diretamente do software PCBA SmartQuality através de comandos enviados para a DLL do *shell* Netica. A Figura 5.12 ilustra o formulário utilizado para aprendizado das redes bayesianas.

Adaptação de novos casos

Inserção automática de componentes SMT - FUJI - CP-6

Aquisição dos casos

Arquivo

Inspeção de processo

Atualização da rede bayesiana

Manter tabelas de probabilidades

Remover tabela de probabilidades

Adquirir casos Salvar casos Apagar casos

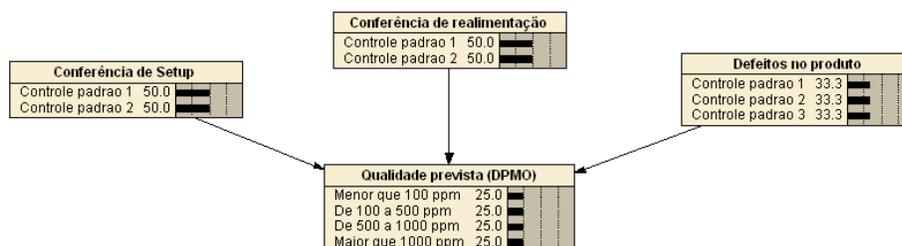
Placa	Lote	IDnum	Conf_Setup	Conf_Realiment	Defeito_Produto	DPMO
7255	20-7255	20	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	220
7255	21-7255	21	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	428
7255	22-7255	22	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	242
7255	23-7255	23	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	293
7255	24-7255	24	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	449
7255	25-7255	25	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	878
ASUS	05-ASUS	26	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_2	126
ASUS	06-ASUS	27	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_2	61
ASUS	07-ASUS	28	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_2	69
ASUS	08-ASUS	29	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_2	34
ASUS	09-ASUS	30	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_2	72
ASUS	10-ASUS	31	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_2	112
ASUS	11-ASUS	32	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_2	62
ASUS	12-ASUS	33	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_2	33
ASUS	13-ASUS	34	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_1	Sob_controle_padrao_2	41

OK Cancelar

Figura 5.12 - Formulário do software PCBA SmartQuality para o aprendizado das tabelas de probabilidades das redes bayesianas

Desta forma, as tabelas de probabilidades das redes bayesianas foram atualizadas com as informações lidas do banco de dados. A Figura 5.13 ilustra um exemplo dos valores das probabilidades antes e após o aprendizado da rede bayesiana.

A - Rede antes do aprendizado



B - Rede após o aprendizado

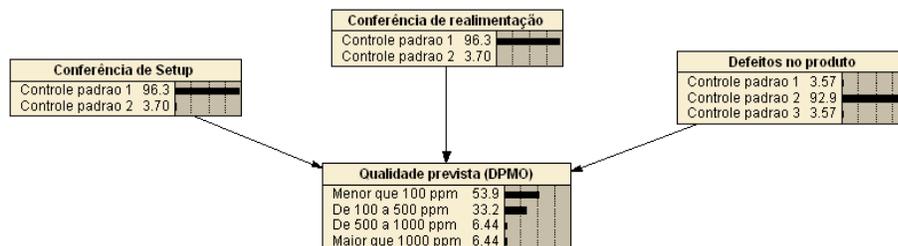


Figura 5.13 - Rede bayesiana aplicada a operação de inserção de componentes SMT

Após o aprendizado das redes bayesianas, a última etapa consistiu na validação da base de conhecimento, ou seja, verificar se as redes bayesianas apresentavam resultados consistentes sobre a qualidade prevista do produto a partir de um determinado plano de controle estabelecido. A Tabela 5.3 apresenta uma síntese de uma avaliação feita entre três placas de características similares. Nesta avaliação foram analisados os dados referentes a cinco tipos diferentes de máquinas de inserção automática de componentes SMT em quatorze lotes de produção. A qualidade prevista representa o resultado apresentado pelo SE após o aprendizado das probabilidades, enquanto que a qualidade atingida foi o resultado medido durante a produção das placas.

Tabela 5.3 - Comparação da qualidade prevista versus qualidade atingida

		Máquinas de inserção automática de componentes SMT				
		JUKI FX-1	JUKI FX-1R	FUJI CP-6	FUJI IP-III	GSM DT-255
Probabilidade prevista em atingir cada nível de qualidade	Menor que 100 DPMO	58,95%	75,45%	9,09%	50%	64,81%
	De 100 a 500 DPMO	33,16%	17,86%	68,18%	44,44%	18,52%
	De 500 a 1000 DPMO	6,44%	3,57%	18,18%	1,85%	11,11%
	Maior que 1000 DPMO	6,44%	3,57%	4,54%	3,70%	5,55%
Qualidade atingida nos lotes de produção	01	57 DPMO	169 DPMO	61 DPMO	327 DPMO	0 DPMO
	02	38 DPMO	149 DPMO	69 DPMO	862 DPMO	0 DPMO
	03	41 DPMO	191 DPMO	34 DPMO	1348 DPMO	1035 DPMO
	04	33 DPMO	179 DPMO	67 DPMO	1004 DPMO	0 DPMO
	05	11 DPMO	244 DPMO	113 DPMO	1242 DPMO	0 DPMO
	06	7 DPMO	94 DPMO	63 DPMO	1539 DPMO	0 DPMO
	07	13 DPMO	74 DPMO	33 DPMO	2320 DPMO	420 DPMO
	08	17 DPMO	57 DPMO	42 DPMO	1746 DPMO	527 DPMO
	09	29 DPMO	51 DPMO	59 DPMO	1591 DPMO	373 DPMO
	10	55 DPMO	49 DPMO	99 DPMO	1387 DPMO	0 DPMO
	11	12 DPMO	81 DPMO	59 DPMO	587 DPMO	0 DPMO
	12	29 DPMO	91 DPMO	112 DPMO	1486 DPMO	607 DPMO
	13	43 DPMO	112 DPMO	108 DPMO	549 DPMO	684 DPMO
	14	44 DPMO	77 DPMO	74 DPMO	892 DPMO	0 DPMO
<p> Processo sob causa especial (máquina arrancando componentes da borda da placa)</p> <p> Placa com projeto inadequado (pads/ilhas da placa com formato inadequado)</p>						

Ressalta-se para este estudo que, as três primeiras máquinas, JUKI FX-1, JUKI FX-1R e FUJI CP-6, inseriram uma grande quantidade de componentes, cerca de 280 componentes. A máquina FUJI IP-III inseriu uma quantidade média de componentes, por volta de 30 componentes e a máquina GSM DT-255 inseriu uma quantidade pequena de componentes, apenas 3 componentes. Esta diferença interferiu na escala de variação do indicador DPMO In-Process, pois o cálculo do indicador não depende apenas do número de defeitos encontrados, mas também do número de oportunidades de defeitos, que neste caso é a quantidade de componentes. Assim sendo, para a máquina FUJI IP-III e principalmente para a GSM DT-255 para um pequeno número de defeito totalizado fez o indicador DPMO In-Process aumentar em uma proporção elevada.

A partir dos dados mostrados na Tabela 5.3 observa-se que para a máquina JUKI FX-1, para a máquina JUKI FX-1R, com exceção dos lotes sob causa especial (marcados na cor amarela), e para a máquina GSM DT-255 a qualidade atingida foi de acordo a probabilidade prevista na maioria dos lotes de produção. Para a máquina FUJI IP-III a qualidade atingida não aconteceu de acordo com o previsto, pois projeto da placa estava inadequado para alguns componentes que eram inseridos nesta máquina, fazendo com que a qualidade atingida fosse pior que a prevista. E, finalmente, para a máquina FUJI CP-6, a qualidade atingida na maioria das vezes foi melhor que a prevista, acredita-se pelo fato da máquina ter passado por uma manutenção preventiva antes dos lotes serem processados.

Portanto, com os resultados obtidos nas operações de inserção de componentes SMT concluiu-se que a base de conhecimento apresentou uma previsão consistente da qualidade, mostrando ser uma ferramenta viável para ser empregada na produção em pequenos lotes. A rede bayesiana permitiu que dados históricos coletados de lotes anteriores fossem usados de forma interativa a fim de obter uma previsão da qualidade do processo na produção de novos produtos. No entanto, a partir dos dados analisados, foi constatado também neste estudo que isto acontece sob certas condições:

- É necessário usar dados de sistemas de inspeção equivalentes: sistemas de inspeção diferentes podem não gerar um resultado previsível, pois defeitos detectados por um determinado sistema de inspeção podem não ser detectados por outro e vice-versa;
- É necessário usar dados de placas semelhantes: placas que diferem em relação a componentes, liga de solda, seqüência de operações, etc., podem gerar resultados totalmente diferentes perante a um mesmo processo.

- Não podem existir desvios no projeto da placa eletrônica: o projeto da placa influi muito no resultado do processo e caso o projeto não esteja adequado, os resultados são imprevisíveis;
- Deve haver uma repetitividade e reprodutibilidade em relação aos controles: caso os controles estabelecidos no plano de controle não sejam executados da mesma forma pelos diversos operadores, os dados gerados não são confiáveis.
- As causas especiais devem ser analisadas: as causas especiais podem reduzir drasticamente o nível de qualidade de um processo. Portanto, deve-se fazer uma análise para verificar se a base de conhecimento irá englobar ou descartar os dados contaminados com causas especiais.

Os resultados deste trabalho inicial de construção da base de conhecimento do SE de predição da qualidade foram apresentados para a equipe de engenharia da empresa que se comprometeu em dar continuidade na coleta e análise dos dados, a fim de expandir e consolidar a base de conhecimento do SE.

5.7 TREINAMENTOS

Para que o software PCBA SmartQuality pudesse ser operacionalizado na empresa foi necessário realizar uma série de treinamentos. Estes treinamentos aconteceram em momentos e locais diferentes. Durante este processo de treinamento percebeu-se a necessidade de criar uma documentação de ajuda (*help*) para a operação do software PCBA SmartQuality, pois o mesmo possuía um grande número de menus de opções. Neste caso foi criado um arquivo de ajuda integrado ao código do software (Figura 5.14).

Os operadores e inspetores da qualidade, responsáveis pela coleta dos dados de inspeção e controle dos processos, foram os primeiros a serem treinados. Este treinamento ocorreu numa sala de aula onde foram disponibilizados computadores equipados com leitores de código de barras e placas eletrônicas defeituosas. Neste treinamento foi simulada no software PCBA SmartQuality a coleta de dados de inspeção, o registro dos controles e a análise dos dados pelos gráficos e indicadores gerados. Em seguida, foi feita a produção piloto de três modelos de placas. Nesta produção realizou-se um acompanhamento dos operadores e inspetores para sanar possíveis dúvidas do software.

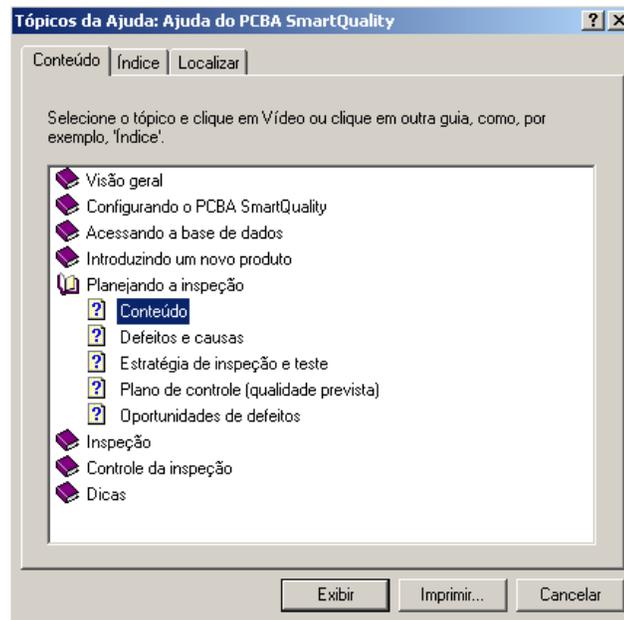


Figura 5.14 - Arquivo de ajuda para operação do software PCBA smartQuality

O segundo treinamento aconteceu para os planejadores da qualidade, responsáveis pela introdução de um novo produto na linha e criação dos planos de controles. Este treinamento ocorreu de acordo com a demanda de produção (*on the job*) durante um período de um mês. Neste mês foram produzidos quatro modelos de placas e para todas estas placas foi realizado o treinamento e acompanhamento de cadastro das informações do produto e geração do plano de controle no software PCBA SmartQuality.

Por fim destaca-se que o treinamento da equipe de engenharia, responsável pela gestão da base de conhecimento dos SE's, ocorreu de forma simultânea nas diversas interações que o autor deste trabalho teve durante a implantação do SI2PL na empresa. Neste período foram sendo repassados de maneira gradativa para engenharia: a proposta do sistema, como o sistema opera, quais são os pré-requisitos, quem são os responsáveis, quais são os resultados gerados e assim por diante. Tudo isto fez com que as informações fossem absorvidas e examinadas por toda a engenharia da empresa.

5.8 RESULTADOS VISUALIZADOS PELA EMPRESA APÓS A IMPLANTAÇÃO DO SI2PL

A implantação do modelo SI2PL gerou uma série de melhorias para o sistema de garantia da qualidade do LABelectron, algumas delas visualizadas de forma imediata e outras somente a médio e a longo prazo.

Quanto aos problemas relacionados ao planejamento da qualidade, uma melhoria expressiva atingida com a implantação do SI2PL diz respeito à tecnologia da informação. O software PCBA SmartQuality elevou a eficácia de armazenamento, processamento e comunicação da informação da qualidade na empresa. Isso foi possível devido a sua estrutura ser concebida para operar na forma cliente-servidor. Deste modo, os múltiplos usuários dos diversos setores da empresa têm acesso a um mesmo banco de dados contendo informações sobre a qualidade dos produtos e conhecimento sobre os processos produtivos.

A definição dos controles padrões para as diferentes operações de processo estruturou e agilizou a criação dos planos de controle. Todo o esforço realizado para a criação das bases de conhecimento dos SE's de busca por similaridade e predição da qualidade permitiu a empresa aumentar o entendimento e domínio sobre seus processos. De uma forma geral, para o planejamento da qualidade o modelo do SI2PL permitiu o gerenciamento mais eficiente das informações da qualidade, incluindo tipos de controles, indicadores, especificações dos produtos, dados de inspeções, etc., tornando o planejamento da inspeção mais consistente e sistematizado.

Em relação aos problemas de controle e melhoria da qualidade, como a empresa não praticava uma coleta e um processamento eficiente dos dados, a melhoria que ficou evidenciada mais rapidamente com a implantação do PCBA SmartQuality foi a agilidade no monitoramento dos dados de inspeção e na tomada de decisão para os desvios nos processos. Uma vez iniciada a operação dos módulos de inspeção e de indicadores visualizou-se de forma bem clara e ágil os problemas que não eram percebidos anteriormente ou eram percebidos fora de tempo, quando a solução para o problema já não fazia mais efeito para a qualidade. A disposição das informações por diferentes tipos de gráficos e através de um conjunto de indicadores da qualidade complementar (FPY, DPU, DPMO End-Item e DPMO In-process) facilitou bastante a visualização da qualidade atingida, superando a dificuldade que o LABelectron possuía em conhecer e caracterizar seus processos.

Outra melhoria alcançada foi a sistematização do controle da qualidade proporcionada pela interação dos módulos do SI2PL. As figuras 5.15 a 5.20 ilustram como a sistemática do SI2PL, através do software PCBA SmartQuality, vem auxiliando a o LABelectron a solucionar os problemas no controle da qualidade e aplicar ações de melhoria.

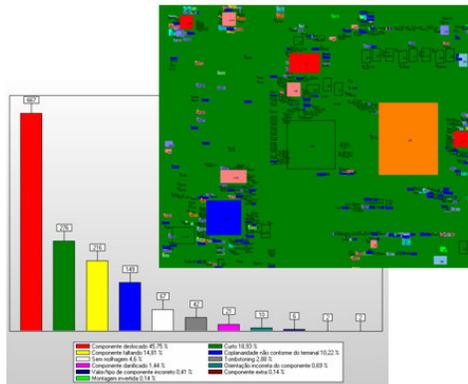


Figura 5.15 - Detecção de um problema (1º momento)



Figura 5.16 - Busca pelas causas raízes (2º momento)

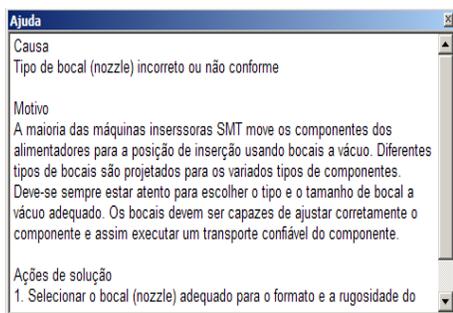


Figura 5.17 - Ações de solução (3º momento)

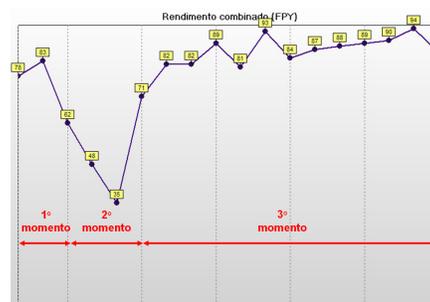


Figura 5.18 - Monitoramento depois de tomada de ação (4º momento)

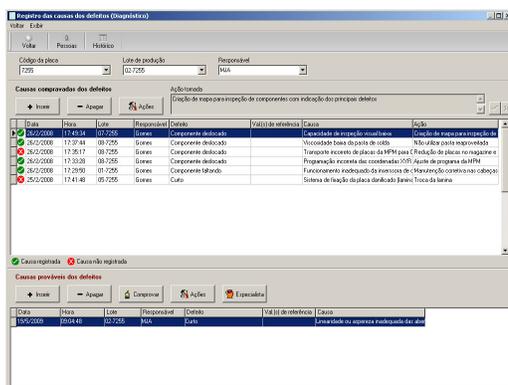


Figura 5.19 - Registro das causas e ações tomadas (5º momento)

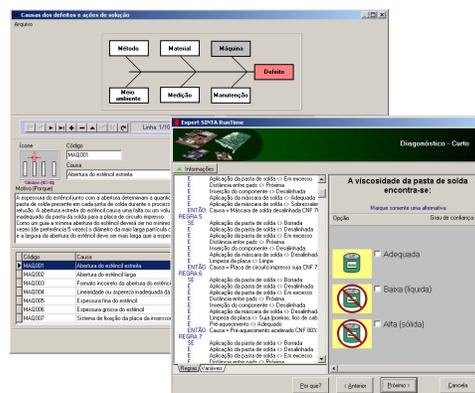


Figura 5.20 - Atualização da base de conhecimento (6º momento)

Esta sistemática inicia-se com monitoramento *on-line* da qualidade do processo e do produto através dos módulos de inspeção e indicadores da qualidade. Quando um problema é detectado, o módulo de diagnóstico do processo assessora na busca das causas raízes dos problemas e nas ações de correção, uma vez que este dispõe de forma interativa e

metodizada em passos (regras) toda a experiência acumulada pela empresa em solucionar os problemas de processo. Após uma ação ser realizada, verifica-se sua eficácia. Caso surja efeito positivo para o problema atual, a causa e ação tomada são registradas na base de dados da qualidade. Ocasionalmente, nos casos em que o sistema de diagnóstico não dispõe em sua base de conhecimento a causa do problema ou ação para sua solução, executa-se a atualização destas informações, a fim de que a base de conhecimento se torne cada vez mais completa e consistente.

A Figura 5.21 ilustra um exemplo da qualidade atingida na produção em alguns lotes de produção no início da implantação e com o uso continuado do software PCBA SmartQuality após um período de quatro meses. Percebe-se que a partir do vigésimo quarto lote de produção o rendimento combinado estabiliza-se no valor médio aproximado de 80%, sendo que antes e no início da implantação do PCBA SmartQuality o processo se comportava de maneira bastante instável com um rendimento combinado médio de aproximadamente 60%.

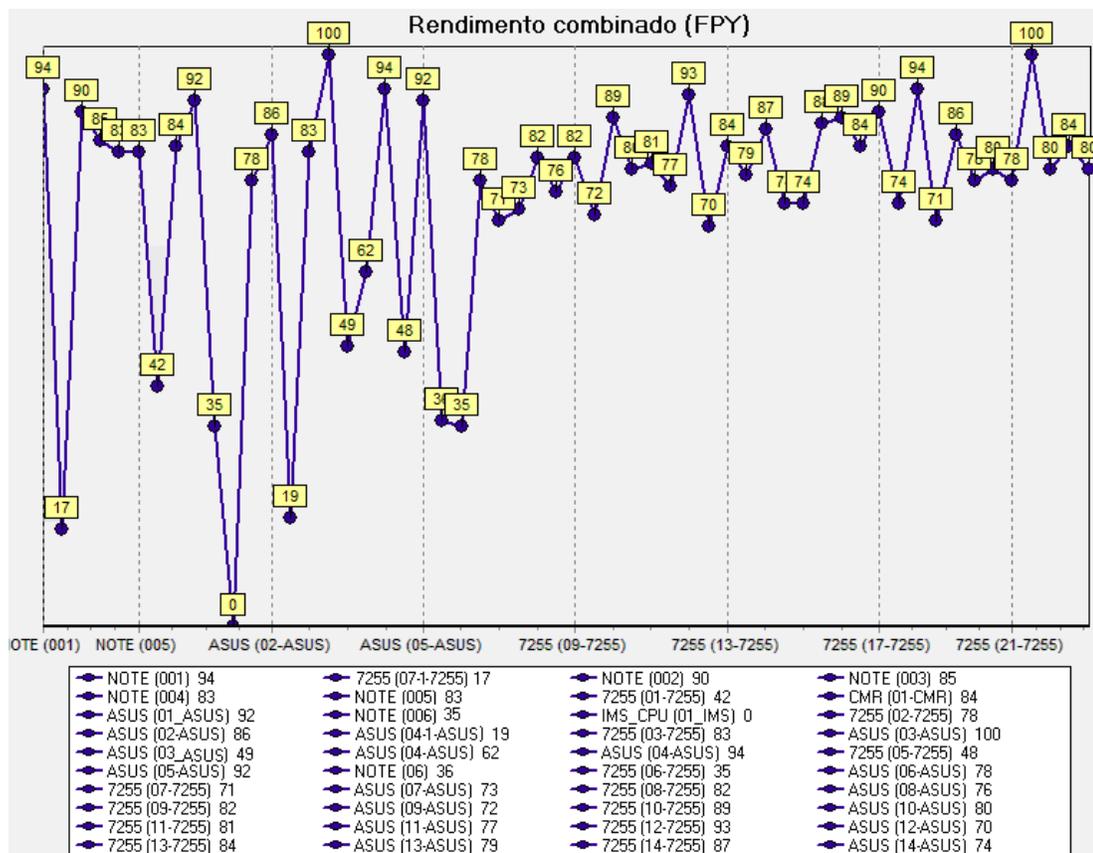


Figura 5.21 - Visualização no software PCBA SmartQuality do nível de qualidade atingida num período de quatro meses de produção

Deste modo, o SI2PL, através dos módulos de inspeção, indicadores e diagnóstico do processo, vem permitindo um aumento da confiabilidade e da flexibilidade operativa durante o diagnóstico dos defeitos, a redução do tempo de diagnóstico e conseqüentemente a redução de retrabalhos e refugos.

5.9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos com a implantação no SI2PL no LABelectron mostraram que todos os módulos contidos no modelo puderam ser aplicados na prática, sendo alguns deles com maior facilidade do que outros. A proposta do modelo de viabilizar o reaproveitamento e o acúmulo de informações obtidas de lotes anteriores, a fim de serem aplicadas na produção dos novos produtos, foi possível de acontecer num ambiente de PPL de montagem de placas eletrônicas.

Para a PPL de montagem de placas eletrônicas o uso de SE's mostrou ser uma ferramenta útil e viável de ser aplicada, principalmente para treinar os operadores e capacitá-los a resolver os problemas no chão de fábrica, além de permitir o aumento do entendimento sobre os processos e a disseminação do conhecimento dentro da empresa.

Os resultados mostraram que embora a implantação do SI2PL no LABelectron tenha acontecido de forma completa, seus recursos foram mais atuantes e expressivos para a correção dos problemas. No entanto, a capacidade do SI2PL de registrar o conhecimento sobre os produtos e processos, representá-lo de forma sistematizada, expandi-lo e reaproveitá-lo, ofereceu à empresa a oportunidade de passar para um estágio mais avançado da garantia qualidade na qual será capaz de atuar de forma preventiva e atingir a qualidade desejada desde a primeira vez.

No entanto, estes resultados podem ser diferentes para outros tipos de ambientes produtivos. Outra aplicação do modelo SI2PL ocorreu numa empresa de transformados plásticos, a qual foi realizada no âmbito de uma dissertação de mestrado do aluno Thiago Mantovani ^[95]. A empresa analisada tem como produto principal tubos plásticos, fabricados pelo processo de extrusão.

Para este estudo de caso foi desenvolvido um novo aplicativo usando a mesma estrutura e código do PCBA SmartQuality, sendo necessário apenas pequenas adaptações na coleta dos dados de inspeção e no cálculo dos indicadores (módulos F e H do SI2PL). Esta compatibilidade deu-se principalmente pelo fato de que tanto para o processo de montagem de placas eletrônicas como para o de fabricação de embalagens plásticas a inspeção acontece apenas por atributos. Especificamente para este estudo de caso, as inspeções realizadas por variáveis para características dimensionais dos tubos plásticos

foram transformadas em atributos. Ou seja, os valores obtidos por medição eram comparados com valor padrão mais ou menos a tolerância, sendo considerado um defeito sempre que ocorresse divergência nestas comparações.

Neste estudo de caso, a implantação de todos os módulos não aconteceu de forma efetiva, especificamente os módulos de predição da qualidade e diagnóstico do processo (Módulos D e E) não foram possíveis de acontecer. No entanto, todos seus recursos foram discutidos e tiveram uma boa aceitação pela empresa, mostrando-se aplicáveis aos seus processos.

Em termos gerais, o SI2PL foi considerado pela empresa como uma ferramenta de fácil operacionalidade e que agregou valor ao sistema de garantia da qualidade atual para obtenção de níveis de qualidade melhores. A implantação do SI2PL proveu suporte, através de informações objetivas da qualidade, para planejar e definir melhor a estratégia de inspeção da empresa. A partir dos módulos implantados foi possível evidenciar os defeitos e processos mais críticos da empresa, para em seguida ser feita uma análise detalhada das causas raízes e planos de ação para controle e melhoria do processo. Quando este nível for atingido, a empresa dispõe de informações evidenciadas das causas de defeitos no produto oriundas do processo e dos controles necessários para controlá-las. Assim, o uso integral do SI2PL poderá ser empregado e todos seus recursos avaliados.

Os resultados obtidos nestes dois estudos de casos foram importantes para avaliar a adequabilidade e eficiência do SI2PL em diferentes ambientes industriais. Percebeu-se que para ambos os setores, os aplicativos desenvolvidos apresentaram-se compatíveis e com características similares com relação à sua implantação e operacionalidade. Porém, destaca-se que tanto para os processos de montagem de placas eletrônicas como os de transformados plásticos a inspeção nos produtos por atributos é predominante, o que facilitou esta compatibilidade. Para os setores industriais onde normalmente aplica-se a inspeção por variável, a compatibilidade do modelo SI2PL com o aplicativo apresentado neste trabalho, PCBA SmartQuality, pode não acontecer tão diretamente, necessitando de outras particularidades e diferentes esforços para ser implementado.

6 CONCLUSÕES E VISÃO DE FUTURO

Neste trabalho, um modelo conceitual de sistema integrado foi desenvolvido e avaliado em um ambiente de PPL. O foco principal deste estudo foi desenvolver uma solução voltada especificamente para atender as dificuldades impostas pela PPL referentes à garantia da qualidade. Acredita-se que foi cumprido o objetivo desta pesquisa ao implantar a solução em ambientes reais de PPL e ter atingido resultados expressivos conforme detalhados nos itens 5.8 e 5.9.

Tendo como ponto de partida assistir as etapas de planejamento, controle e melhoria da qualidade, a solução proposta agregou métodos de engenharia da qualidade, base de dados contendo informações do produto e do processo e recursos de Inteligência Artificial. O modelo apresentado no Capítulo 3, nomeado de SI2PL (Sistema Integrado para Produção em Pequenos Lotes), é o alicerce para a criação de uma ferramenta computacional, a qual deve ser desenvolvida para atingir os propósitos estabelecidos e viabilizar a operacionalização do SI2PL na prática.

Foram apresentados nos Capítulos 1 e 2 a grande dificuldade de uma PPL em relação à garantia da qualidade. Uma das premissas usadas na criação do SI2PL foi permitir um gerenciamento eficaz das informações da qualidade. Para isto, sua estrutura foi estabelecida com o propósito de armazenar, reaproveitar e disponibilizar aos diferentes níveis organizacionais da empresa informações sobre a qualidade do produto e o desempenho dos processos. Estas informações são processadas durante as diferentes fases do ciclo de vida do produto e ficam acessíveis na base de dados da qualidade do sistema. O foco principal neste caso foi de ajudar nas dificuldades de entendimento e domínio sobre o processo e proporcionar a oportunidade de melhoria de sua capacidade.

Outro fator determinante na estruturação do SI2PL foi criar uma solução capaz de auxiliar nos problemas da falta de informações e de tempo para executar as ações de planejamento, controle e melhoria. Para isto, SE's foram integrados em sua estrutura com a finalidade de interagir com o usuário de forma simples e rápida a partir de uma base de conhecimento. Por sua vez, a base de conhecimento, composta por informações históricas e heurísticas, teve o propósito de consolidar a *expertise* da empresa de forma incremental, flexível e estruturada. Na etapa de planejamento da qualidade, o emprego do SE foi para prover suporte na elaboração do plano de controle, enquanto que nas etapas de controle e melhoria da qualidade foi para auxiliar o diagnóstico e o ajuste do processo.

Foi comprovado experimentalmente, a partir da implantação prática em um empresa com problemas de qualidade típicos da PPL, que o SI2PL melhorou o sistema de garantia da qualidade, auxiliou na solução dos problemas da qualidade e incentivou a melhoria contínua da qualidade, conforme detalhado no item 5.8. Quanto à adequação de sua estrutura e os propósitos estabelecidos, o modelo do SI2PL mostrou ser totalmente viável, sendo os oito módulos propostos suficientemente flexíveis aos processos produtivos aplicados.

Outro fato observado foi a constatação de que o desenvolvimento computacional para converter o modelo abstrato do SI2PL em um aplicativo (software) é um trabalho complexo. Uma vez que seu desenvolvimento completo pode abranger diferentes linguagens de programação, base de dados, integração entre softwares (*shells*), comunicação servidor-cliente e outras particularidades. Verificou-se que para garantir sucesso na implantação e no uso contínuo do aplicativo é essencial que durante seu desenvolvimento sejam levadas em consideração algumas características inerentes, as quais se destacam: possuir interfaces simples e auto-explicativas, especialmente aquelas que serão executadas por operadores de chão de fábrica; ser ágil nas consultas e registros na base de dados; não existir redundância de registro de informações; proteção contra erros de manuseio operacional; recursos gráficos para visualização e análise dos dados.

Uma das grandes dificuldades encontradas durante a implantação do SI2PL na empresa foi o grande número de pessoas envolvidas de níveis organizacionais distintos. Neste caso, a execução de treinamentos e o envolvimento efetivo dos responsáveis pela operacionalização levaram tempo e exigiram esforços consideráveis. Foi observado que devido o escopo e a abrangência SI2PL envolver uma modificação no sistema de garantia da qualidade atual da empresa, sua implantação e operacionalização somente se torna possível a partir do comprometimento da diretoria e dos demais envolvidos. De modo que a infra-estrutura exigida (computadores servidor e clientes ligados em rede) possa ser disponibilizada e as informações necessárias e ferramentas da qualidade inseridas no SI2PL possam ser praticadas. Além disso, faz-se necessário que a empresa possua uma engenharia da qualidade atuante e um sistema de garantia da qualidade padronizado.

Com relação à aplicação de SE's, este trabalho confirmou resultados anteriormente obtidos por outros autores de que a criação de uma base de conhecimento consistente é o principal entrave na implantação e no uso contínuo de um SE. Devido aos objetivos traçados e com o intuito de desenvolver um modelo amplo e genérico de sistema integrado, neste trabalho o autor não foi o responsável direto em desenvolver as bases de conhecimento dos SE's propostos, e sim em disponibilizar uma estrutura computacional mais ampla, composta de base de dados, interfaces e ferramentas (*shells*) para criação e

operacionalização de SE's. Assim, a responsabilidade da criação da base de conhecimento dos SE's foi repassada para funcionários de dentro da empresa onde o estudo de caso foi realizado. Esta metodologia de criação da base de conhecimento foi utilizada devido ao grande dinamismo de informações da PPL e com objetivo de permitir a empresa capturar, estruturar e registrar de forma acumulativa os conhecimentos obtidos sobre seus produtos e processos.

De uma forma generalizada, dentre os três SE's contidos no SI2PL, a criação da base de conhecimento do SE de predição da qualidade mostrou ser a mais complexa de ser desenvolvida, uma vez que sua criação não foi possível de acontecer de forma instantânea, pois é muito raro que uma empresa tenha conhecimento prévio capaz de quantificar a eficiência de cada controle aplicado ao seu processo. Com isso, foi preciso anteriormente validar estas informações a partir do monitoramento dos dados históricos da qualidade. Observou-se que, a partir do armazenamento de informações históricas obtidas com a implantação do SI2PL e testes em casos práticos, o SE de predição da qualidade é aplicável à PPL, gerando resultados consistentes. Porém, esta previsão aconteceu respeitando certas condições, as quais foram destacadas na seção 5.6 deste trabalho.

O desenvolvimento da base de conhecimento dos outros dois SE's, aplicados com a finalidade de buscar produtos semelhantes e diagnosticar o processo, mostrou ser mais rápido e simples de acontecer, pois geralmente uma empresa já possui internamente, senão todo, pelo menos grande parte do conhecimento necessário para o desenvolvimento destas bases. Verificou-se que a criação destas bases de conhecimento e o uso dos SE's permitiram a empresa organizar e aumentar o conhecimento e o domínio sobre seus produtos e processos e disseminar estes conhecimentos entre seus funcionários

Com os resultados obtidos pode-se verificar que na PPL a integração de SE's ao sistema de garantia da qualidade é possível de acontecer e ajuda a empresa superar desafios como: tomar decisões sem ter informações precisas, ter rapidez na geração de resultados, possuir um grau elevado de *expertise* sobre os processos, tornar operadores habilidosos para o ajuste e controle do processo e ser capaz de acumular informações históricas.

Portanto, o *status* atingindo com o presente trabalho demonstra que a utilização de um modelo de sistema computacional de processamento de informações que integra métodos de engenharia da qualidade, base de conhecimento sobre o produto e o processo e recursos de Inteligência Artificial permite uma empresa superar os principais problemas da PPL referentes à garantia da qualidade. No entanto, para que isso aconteça o modelo criado nesse trabalho deverá ser suportado por uma preparação e um acompanhamento

adequado durante sua implantação. E ainda, que a empresa possua um sistema de garantia da qualidade padronizado, um compromisso efetivo com a utilização do sistema e um conhecimento adequado sobre processo fabril. Assim sendo, todas as informações requeridas podem ser preenchidas e seu conteúdo irá retratar realmente o ambiente produtivo e o nível de qualidade da empresa.

Em vista dos argumentos apresentados entende-se que uma das contribuições desta pesquisa no campo da garantia da qualidade é a proposta de um modelo voltado para a PPL, o qual vem preencher parcialmente um nicho de estudos ainda incipiente na literatura. Outra colaboração se delinea com a possibilidade de fornecer uma base teórica que possa ser útil à indústria de manufatura em pequenos lotes que se proponha a uma reorganização mais racional de seus métodos e ferramentas da qualidade. Numa perspectiva mais aplicada, a contribuição consistiu em mostrar as particularidades da PPL e as principais dificuldades enfrentadas. Desta pesquisa podem-se ainda originar propostas de diferentes sistemas de garantia da qualidade, especialmente para PPL. Portanto, percebe-se um grande potencial de atuação na continuidade desse tema, face à constatação da grande demanda pela sistematização e racionalização da engenharia da qualidade para PPL. Sugere-se por essa razão a continuidade desse trabalho nas seguintes vertentes:

- Implantação prática e avaliação do SI2PL em outros segmentos industriais, especialmente naqueles que o controle da inspeção acontece predominantemente por variáveis;
- Tornar o modelo capaz de realimentar as informações da qualidade no cliente para avaliar a eficiência do plano de controle;
- Automatizar os módulos de registro dos controles e inspeção e avaliar o impacto gerado.
- Introdução de novos módulos ao modelo do SI2PL, tais como, módulo para controle do processo específico à PPL (p. ex.: gráficos de controle de corrida curta) e módulos para coleta e ajuste automático dos parâmetros de processo e dos dados de inspeção;
- Implantar e avaliar outros tipos de paradigmas e outras formas de representação do conhecimento para construção dos SE's propostos no SI2PL.

REFERÊNCIAS

- [1] LINS, B. E. **Breve história da engenharia da qualidade.** Disponível em: <www.abordo.com.br/aslegis/cd1206.pdf>. Acesso em 7 set. 2005
- [2] FAYOL H. **Administração industrial e geral: Previsão, Organização, Comando, Coordenação e Controle.** 10ª edição, São Paulo: Atlas, 1990. 144 p.
- [3] TAYLOR, F. W. **The Principles of Scientific Management.** Kessinger Publishing, 2004. 88 p.
- [4] BATCHELOR, R. **Henry Ford, Mass Production, Modernism, and Design: Mass Production, Modernism and Design.** Manchester University Press ND, 1994. 150 p.
- [5] DODGE, H. F.; ROMIG H. G. **Sampling Inspection Tables: Single and Double Sampling.** 2nd edition, Wiley, 1998. 240 p.
- [6] SHEWHART, W. A. **Economic Control of Quality of Manufactured Product.** Milwaukee: American Society for Quality, 1980. 501 p.
- [7] FEIGENBAUM, A. V. **Total Quality Control.** 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 1991. 863 p.
- [8] JURAN, J. M.; GODFREY, A. B.; HOOGSTOEL, R. E.; SCHILLING, E. G. **Juran's Quality Handbook.** 5th Edition, USA: McGraw-Hill, Inc, 1998. 1730 p.
- [9] DEMING, W. E. **The New Economics: For Industry, Government, Education.** 2nd Edition, MIT Press, 2000. 247 p.
- [10] MAHONEY, R. M. **High-Mix Low-Volume Manufacturing.** New Jersey: Pertince Hall, 1997. 222 p.
- [11] WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; RODOS, D. **A mentalidade enxuta das empresas: elimine o desperdício e crie riquezas.** Rio de Janeiro : Campus, 1998. 427p.
- [12] BOLWIJNT, P. T.; KUMPE, T. **Manufacturing in the 1990s: productivity, flexibility and innovation.** v. 23, n. 4, Long Range Planning, 1990.

- [13] SLACK, N., CHAMERS, S., *et al.* **Administração da Produção**. 1.ed. São Paulo: Atlas, 1997. 726p.
- [14] GROOVER, M. P. **Automation, production systems, and computer integrated manufacturing**. Prentice-Hall, cop., 2000, 856p.
- [15] HITOMI, K. **Manufacturing Systems Engineering: A Unified Approach to Manufacturing Technology, Production Management, and Industrial Economics**. 2nd edition, CRC Press, 1996. 536 p.
- [16] GIBSON, P.; GREENHALGH, G.; KERR, R. **Manufacturing Management**. Kluwer Academic Publishers, 2007, 336p.
- [17] MILTENBURG, J. **Manufacturing Strategy: How to Formulate a Winning Plan**. Portland: Productivity Press, Inc, 1995. 372 p.
- [18] PYZDEK, T.; KELLER, P. A. **Quality Engineering Handbook**, 2nd edition, CRC Press, 2003. 732 p.
- [19] DEL CASTILLO, E.; GRAYSON, J.; MONTGOMERY; D. & RUNGER, G., **A Review of Statistical Process Control Techniques for Short Run Manufacturing Systems**, Communications in Statistics-Theory and Methods, 1996, Vol 25, No 11, p 2723-2737.
- [20] LIN, S.; LAI, Y.; CHANG, S. **Short-run statistical process control: Multicriteria part family formation**. Quality and reliability engineering international, 1997, Vol. 13, No. 1, p 9-24.
- [21] WHEELER, D. J. **Short Run SPC**. Knoxville, TN: SPC Press Inc, 1991. 62 p.
- [22] JADHAV, S. A. **Setup Approval and Self Starting Schemes for Short Production Runs** Pune, 2005, 103 p. MEng thesis, University of Pune.
- [23] BLACK, J.T. **Projeto da fábrica com futuro**. Porto Alegre, Editora Bookman, 2001, 627 p.
- [24] JHA, N. K. **Handbook of Flexible Manufacturing Systems**. Academic Press, San Diego, CA, 1991, 328 p.

- [25] SPROVIERI, J. **Managing High-Mix, Low-Volume Assembly March 5, 2004.** Disponível em: <http://www.assemblymag.com/CDA/Archives/0a26022c106c9010VgnVCM100000f932a8c0_____> Acesso em: 27 mai. 2006
- [26] BURGESS, T. **Quality management for manufacturers of short run semi-customized products** The TQM Magazine, Volume 11, Number 4, 1999 , p. 24-25
- [27] LORINI, F. J. **Tecnologia de grupo e organização da manufatura.** Editora da UFSC, Florianópolis, 1993, 105 p.
- [28] DIVERSIFIEDSYSTEMS, INC. **SMT Process Capability for Small Lots.** Disponível em: <http://www.divsys.com/newsletter/april2002/smt.asp> Acesso em 28 mai. 2008.
- [29] AL-SALTI, M.; STATHAM A. **The Application of Group Technology Concept for Implementing SPC in Small Batch Manufacture.** International Journal of Quality & Reliability Management. V.11, Issue 4, p. 64-76. 1994
- [30] SUNTAG, C. **Inspection and inspection management.** Milwaukee: ASQC Quality Press, 1993, 593p.
- [31] PFEIFER, T.; TORRES, F. **Manual de Gestión e Ingeniería de la Calidad.** Mira Editores, Zaragoza: España, 1999, 2ª Edición, 589p.
- [32] PFEIFER, T. **Production Metrology.** German: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2002, 421p.
- [33] WINCHELL, W. **Inspection and Measurement in Manufacturing, keys to process planning and improvement.** USA: Society of Manufacturing Engineers, 1996. 197 p.
- [34] INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA. **APQP - Planejamento Avançado da Qualidade do Produto e Plano de Controle.** 1997. Manual de Referência.
- [35] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 16949:** Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevance service part organizations, 2002.
- [36] STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis – FMEA from theory to execution.** Milwaukee: ASQC Quality Press, 1995.

- [37] INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA. **FMEA - Análise de modo e efeitos de falha potencial**. Manual de Referência. São Paulo, 2001.
- [38] HUTCHINS, G. B. **Introduction to Quality Control, Assurance, and Management**. USA: Macmillan Publishing Company, New York, 1991. 289 p.
- [39] WHEELER, D. J.; CHAMBERS, D. S. **Understanding statistical process control**. 2 ed. Tennessee: SPC Press, 1992. 406p.
- [40] STEPHENS, J. C. **Improve Your Visual Inspection Program**. Manufacturing Engineering, v.130, n.4, Apr. 2003. p.13
- [41] DONATELLI, G. D.; BOCHÉ, S.; LUCCAS, J. **Influencia del error de medición en la inspección 100%**. Sociedad Argentina de Estadística. Neuquén, 2001.
- [42] DONATELLI, G. D. **Quality assurance of industrial measurements – Tribulations of a practitioner**. Key-note lecture, 2004.
- [43] GONÇALVES, A. A. JR. **Metrologia - Parte I**, LABMETRO - Laboratório de Metrologia e Automatização - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 129 p. Apostila.
- [44] DONATELLI, G. D.; DAVIS, J. **The cost of the conformity with specifications**. Metrologie. Bordeaux, 1999.
- [45] KONRATH, A. C.; DONATELLI, G. D. **Efeito da incerteza de medição no controle estatístico de processos**. COBEF, 2005.
- [46] DONATELLI, G. D.; SCHNEIDER, C. A., BARP, A. M. **The influence of measurement errors on the values of process capability indices**. International Symposium on Metrology and Quality Control. Viena, 1998.
- [47] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9001: Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2000.
- [48] AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **Análise dos sistemas de medição**. 3 ed. São Paulo, 2004.

- [49] IRANI, S. A. **Challenges of Implementing Lean in a Job Shop**. Next Generation Manufacturing. January, 2006. Disponível em: <<http://mfg-research.blogspot.com/2006/01/challenges-of-implementing-lean-in-job.html>> Acesso em: 27 jun 2006.
- [50] PAN, R. **Statistical process adjustment methods for quality control in short-run manufacturing**. Pennsylvania, 2002 250f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) The Pennsylvania State University.
- [51] ROTONDARO, R. G. **Seis Sigma – Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços**. São Paulo: Ed. Atlas, 2002 375p.
- [52] Setchi, R.M.; Lagos, N. **Reconfigurability and reconfigurable manufacturing systems: state-of-the-art review**. Industrial Informatics, 2004. INDIN apos;04. 2004 2nd IEEE International Conference on. 26-26 June 2004 p. 529 - 535.
- [53] BLAZEWICZ, J., DOMSCHKE, W., PESCH, E. **The job shop scheduling problem: Conventional and new solutions techniques**. European Journal of Operational Research, v.93, p. 1-33, 1996.
- [54] LUCERO A. G. R. **Um método de otimização para a programação da manufatura em pequenos lotes**. Florianópolis, 2001, 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [55] ZATTAR I. C. **Metodologia para implantação de um sistema de programação da produção com capacidade finita em empresas prestadoras de serviços**. Campinas, 2003, 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Sociedade Educacional de Santa Catarina.
- [56] ELAM, M. E. **Control Charts for Short Production Runs**. Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability, March 2008.
- [57] ARENAS L. **Cartas de control de corrida corta: estudio introductorio**. Neuquén, Noviembre 2005. Trabajo final de control estadístico de procesos. Facultad de Economía y Administración – U. N. del Comahue.
- [58] CHENG; C.S. **Group technology and expert systems concepts applied to statistical process control in small-batch manufacturing**. Arizona, 1989. 382p. PhD thesis, Arizona State University.

- [59] HOWELL, J.; YOUNG, R.C. **Reasoning about correlation-based inspection of small-batch-manufactured objects.** Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 12, Number 3, September 1996 , pp. 243-249.
- [60] PFEIFER, T.; MERGET, M. **Methodology to estimate the feasibility of Inspection tasks in Concurrent Engineering (CE).** In: Proceedings of the International Conference on TQM and Human Factors, Linköping: Centre for Studies of Humans, Technology and Organization, 1999, 15-17 Juni S. 194-199.
- [61] DAVÉ, V. R.; HARTMAN, D. A.; KING, W. H.; COLA, M. J.; VAIDYA, R. U. **Strategy for Small-lot Manufacturing – In-process monitoring and control.** LOS ALAMOS SCIENCE, v. 28, p. 63-67. USA, 2003.
- [62] ZHU; Y. D. **A framework of computer-aided short-run SPC planning system.** Singapore, 2005. MEng thesis, National University of Singapore.
- [63] LIAN, Z.; COLOSIMO, B. M. CASTILLO DEL, E. **Setup adjustment of multiple lots using a Sequential Monte Carlo method.** Technometrics, 2006, Vol. 48, Number 3, pp. 373-385.
- [64] JIANG, X.; ZHANG Y.; ZHAO K.; WANG W. **Research on multi-type & small batch oriented process quality control system under network environment.** in: Automation and Logistics, IEEE International Conference on. 1-3 Sept. 2008. pp. 869-874.
- [65] LI, G.; WANG, H. **Research on Quality Control Technology of Capacity Flexibility Oriented to Multi-Specification & Small Batch.** in: Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. WiCOM 08. 4th International Conference on. 12-14 Oct. 2008 p. 1-5.
- [66] KUNZMANN, A.; PFEIFER, T.; SCHMITT, R.; SCHWENKE, H.; WECKENMANN, A. **Productive Metrology - Adding Value to Manufacture.** 55th CIRP General Assembly, Antalya, Turkey. In: Annals of the CIRP Vol. p. 691-704, 2005.
- [67] CASTILLO, E.; ALVAREZ, E. **Expert systems: uncertainty and learning.** Springer, 1991. 331 p.
- [68] LIEBOWITZ, J. **The handbook of Applied Experts Systems.** USA: CRC Press, 1997. 1997. 868 p.

- [69] NASSAR, S. M. **Tratamento de incerteza: Sistemas Especialistas Probabilísticos**, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 68 p. Apostila.
- [70] SILVA, J. C. **Sistemas Especialistas**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 69 p. Apostila.
- [71] SILVA, S. C. M.; COSTA W. S. **Aquisição de conhecimento: o grande desafio na concepção de Sistemas Especialistas**. Disponível em: <<http://www.cefetrn.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/71/77>> Acesso em: 17 mai. 2008
- [72] LABORATÓRIO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL. **Shell Expert Sinta: Uma ferramenta Visual para Construção de Sistemas Especialistas**. Disponível em: <<http://www.lia.ufc.br/~bezerra/exsinta/exsintashell.htm>> Acesso em: 30 jun. 2006.
- [73] BOLSTAD, W. M. **Introduction to Bayesian statistics**. Wiley-IEEE, 2004. 354 p.
- [74] KORB, K. B.; NICHOLSON, A. E. **Bayesian Artificial Intelligence USA**: CRC Press, 2004. 366 p.
- [75] LEAKE, D. B. **Case-Based Reasoning: Experiences, Lessons & Future Directions**. AAAI Press/ MIT Press, 1995. 525p.
- [76] KACPRZYK, J. **Multistage fuzzy control**. Chichester, UK: John Wiley Sons, 1997. 327p.
- [77] MONTEVECHI, J. A. B. **Contribuição para identificação de similaridades entre peças: abordagem baseada na lógica fuzzy em sistemas de apoio computadorizados**. São Paulo, 1995. 291f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.
- [78] COST, S.; SALZBERG, S. **A weighted nearest neighbor algorithm for learning with symbolic features**. Machine Learning 10, 57-78, 1993.
- [79] JENSEN, F.V. **Bayesian Networks and Decision Graphs**. Springer, 2001. 294p.
- [80] SAHEKI, A. H.; SHAROVSKY, R.; COZMAN, F. G.; COUPÉ, V. **Construção de uma rede Bayesiana aplicada ao diagnóstico de doenças cardíacas**. In: Encontro Nacional de Inteligência Artificial (ENIA), 2003, Campinas. Anais do Encontro Nacional de Inteligência Artificial, 2003. 10p.

- [81] SMED, J.; JOHNSON, M.; JOHTELA, T.; NEVALAINEN, O. **Techniques and Applications of Production Planning in Electronics Manufacturing Systems**. New Jersey, 2003, World Scientific Publishing, in C. T. Leondes, Manufacturing Processes, volume 5 of Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems, p. 1-48.
- [82] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-CM-770E: Component Mounting Guidelines for Printed Board**, Jan. 2004.
- [83] BOGATIN, E. **ROADMAPS OF PACKAGING TECHNOLOGY**. Scottsdale, 1997, Integrated Circuit Engineering Corporation.
- [84] WOODGATE, R. W. **The Handbook of Machine Soldering: SMT and TH**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [85] DORO, M. M. **Sistemática para implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso**. Florianópolis, 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.
- [86] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC-7912A: End-Item DPMO for Printed Circuit Board Assemblies**, July 2000.
- [87] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **IPC-9261: In-Process DPMO and Estimated Yield for PWAs**, March 2002.
- [88] 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.
- [89] ORESJO, S. **Defects levels for different component types at the PCBA manufacturing process**, Agilent Technologies, Loveland, Colorado, 1999.
- [90] NATIONAL ELECTRONICS MANUFACTURING CENTER OF EXCELLENCE. **The Science of Stencil Printing**. emphasis, p. 1-2, January, 2000.
- [91] OPPERMAN, M.; SAUER, W.; WOHLRABE, H.; ZERNA, T. **Quality process optimization by using "dynamic programming"**. Dresden University of Tech. SMTA International Conference 30 set. 2001.

- [92] HUTCHINS, C. L. **Troubleshooting the Surface Mount and Fine Pitch Technology process.** Raleigh, North Carolina: C. Hutchins and Associates, 1997.
- [93] BHOJA, S. **Optimization of the Assignment of Printed Circuit Cards to Assembly Lines in Electronics Assembly.** Virginia, 1998. 98 f. Thesis (Master). Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [94] LAMBERT, S.; ABDULNOUR, G.; DROLET, J.; CYR, B. **Flexibility analysis of a surface mount technology electronic assembly plant: An integrated model using simulation.** International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2005, 17, No. 2, p. 151-167.
- [95] MANTOVANI, T. **Planejamento da inspeção na produção em lotes - uma aplicação em embalagens plásticas.** Florianópolis, 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.

APÊNDICE A

REGRAS DE PRODUÇÃO PARA DIAGNÓSTICO DO CURTO (PONTE DE SOLDA) APÓS MÁQUINA DE SOLDA ONDA

- Regra 1 SE Aplicação do fluxo <> Adequada
ENTÃO Causa = Aplicação incorreta de fluxo CNF 95%
- Regra 2 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
E Propriedades do fluxo <> Adequadas
ENTÃO Causa = Fluxo contaminado CNF 90%
Causa = Baixa atividade do fluxo (quantidade de sólidos) CNF 65%
- Regra 3 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
E Onda laminar <> Adequada
ENTÃO Causa = Onda laminar alta CNF 85%
Causa = Onda laminar irregular CNF 70%
Causa = Onda laminar baixa CNF 65%
- Regra 4 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
E Onda laminar <> Inadequada
E Velocidade da esteira <> Adequada
ENTÃO Causa = Velocidade baixa da esteira CNF 85%
Causa = Velocidade alta da esteira CNF 85%
- Regra 5 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
E Onda laminar <> Inadequada
E Velocidade da esteira <> Inadequada
E Propriedades da solda <> Adequadas
ENTÃO Causa = Solda contaminada CNF 85%
Causa = Excesso de borra de solda CNF 80%
Causa = Temperatura baixa da solda CNF 65%
- Regra 6 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
E Onda laminar <> Inadequada
E Velocidade da esteira <> Inadequada
E Propriedades da solda <> Inadequadas
E Tamanho do terminal <> Adequado
ENTÃO Causa = Terminal do componente longo CNF 80%
- Regra 7 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
E Onda laminar <> Inadequada
E Velocidade da esteira <> Inadequada
E Propriedades da solda <> Inadequadas
E Tamanho do terminal <> Longo
E Design da placa <> Adequado
ENTÃO Causa = Distância muito próxima entre componentes SMT CNF 75%
Causa = Pad de solda muito próximo CNF 70%
Causa = Orientação dos componentes SMT transversal a direção da onda CNF 70%
- Regra 8 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
E Onda laminar <> Inadequada
E Velocidade da esteira <> Inadequada
E Propriedades da solda <> Inadequadas
E Tamanho do terminal <> Longo
E Design da placa <> Inadequado

- E Temperatura de pré-aquecimento <> Adequada
 ENTÃO Causa = Temperatura baixa de pré-aquecimento CNF 70%
 Causa = Temperatura alta de pré-aquecimento CNF 70%
- Regra 9 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
 E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
 E Onda laminar <> Inadequada
 E Velocidade da esteira <> Inadequada
 E Propriedades da solda <> Inadequadas
 E Tamanho do terminal <> Longo
 E Design da placa <> Inadequado
 E Temperatura de pré-aquecimento <> Inadequada
 E Ângulo da esteira <> Adequado
 ENTÃO Causa = Ângulo pequeno da esteira CNF 80%
- Regra 10 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
 E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
 E Onda laminar <> Inadequada
 E Velocidade da esteira <> Inadequada
 E Propriedades da solda <> Inadequadas
 E Tamanho do terminal <> Longo
 E Design da placa <> Inadequado
 E Temperatura de pré-aquecimento <> Inadequada
 E Ângulo da esteira <> Pequeno
 E Deflexão da placa <> Adequada
 ENTÃO Causa = Deflexão excessiva da placa de circuito impresso CNF 75%
- Regra 11 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
 E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
 E Onda laminar <> Inadequada
 E Velocidade da esteira <> Inadequada
 E Propriedades da solda <> Inadequadas
 E Tamanho do terminal <> Longo
 E Design da placa <> Inadequado
 E Temperatura de pré-aquecimento <> Inadequada
 E Ângulo da esteira <> Pequeno
 E Deflexão da placa <> Excessiva
 E Alinhamento da máscara de solda <> Adequada
 ENTÃO Causa = Máscara de solda desalinhada CNF 70%
- Regra 12 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
 E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
 E Onda laminar <> Inadequada
 E Velocidade da esteira <> Inadequada
 E Propriedades da solda <> Inadequadas
 E Tamanho do terminal <> Longo
 E Design da placa <> Inadequado
 E Temperatura de pré-aquecimento <> Inadequada
 E Ângulo da esteira <> Pequeno
 E Deflexão da placa <> Excessiva
 E Alinhamento da máscara de solda <> Desalinhada
 E Limpeza da placa <> Limpa
 ENTÃO Causa = Placa de circuito impresso suja CNF 60%
- Regra 13 SE Aplicação do fluxo <> Inadequada
 E Propriedades do fluxo <> Inadequadas
 E Onda laminar <> Inadequada
 E Velocidade da esteira <> Inadequada
 E Propriedades da solda <> Inadequadas
 E Tamanho do terminal <> Longo
 E Design da placa <> Inadequado
 E Temperatura de pré-aquecimento <> Inadequada
 E Ângulo da esteira <> Pequeno
 E Deflexão da placa <> Excessiva
 E Alinhamento da máscara de solda <> Desalinhada
 E Limpeza da placa <> Suja
 E Funcionamento da máquina solda onda <> Adequado
 ENTÃO Causa = Funcionamento inadequado da máquina de solda por onda CNF 75%