

Daniel Fritzke Ferreira de Melo

**DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA AUTOMÁTICA PARA
INSPEÇÃO ÓPTICA DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
EM PEQUENAS SÉRIES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas. Área de Concentração: Automação e Sistemas Mecatrônicos.
Orientador: Prof. Dr.-Ing. Marcelo Ricardo Stemmer

Florianópolis
2013

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

Melo, Daniel Fritzke Ferreira de

Desenvolvimento de Máquina Automática para Inspeção
Óptica de Placas de Circuito Impresso / Daniel Fritzke
Ferreira de Melo ; orientador, Marcelo Ricardo Stemmer -
Florianópolis, SC, 2013.

123 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Produção em
Pequenas Séries. 3. Placa de Circuito Impresso. 4. Inspeção
Óptica Automática. 5. Mecatrônica. I. Stemmer, Marcelo
Ricardo. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e
Sistemas. III. Título.

Daniel Fritzke Ferreira de Melo

**DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA AUTOMÁTICA PARA
INSPEÇÃO ÓPTICA DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
EM PEQUENAS SÉRIES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas

Florianópolis, 24 de abril de 2013.

Prof. Jomi Fred Hübner, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Werner Kraus Júnior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Marcos Marinovic Doro, Dr.
Instituto Federal de São Paulo

Dedico este trabalho aos meus pais, Marco Antônio e Cleody, pelo seu apoio e confiança em minhas decisões. Aos meus irmãos Andréa e Rafael e à minha namorada Rosana, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me dado saúde e proteção ao longo de minha vida.

Agradeço também ao professor Marcelo Ricardo Stemmer por sua orientação, paciência e ensinamentos ao longo deste trabalho.

Ao professor e colega Mário Lucio Roloff que, informalmente, me coorientou neste trabalho, ajudando em importantes etapas para concluí-lo.

Ao Departamento Metal Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, que disponibilizou os equipamentos necessários para fabricar as peças deste projeto e ao professor Aurélio da Costa Sabino Netto, pela paciência e por ter disponibilizado seu tempo livre para a fabricação das mesmas.

Ao Departamento de Automação e Sistemas por terem permitido a realização deste trabalho e ao CNPq e CAPES pelo seu financiamento.

Aos meus pais, Marco Antônio e Cleody, pelo amor, carinho e que nunca mediram esforços para que eu alcançasse meus objetivos.

Aos meus irmãos Andréa e Rafael, pelo companheirismo, amizade e conselhos ao longo de minha vida.

À minha namorada Rosana, pelo seu amor, carinho e amizade que me dão forças para lutar e atingir meus objetivos.

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Tentar adquirir experiência apenas com a teoria é a mesma coisa que tentar matar a fome apenas lendo o cardápio.

(Autor Desconhecido)

RESUMO

A crescente demanda por produtos cada vez mais customizados fez surgir um novo modelo no meio industrial, chamado de Produção de Pequenas Séries. Pesquisadores têm reunido esforços para minimizar os problemas causados por este tipo de produção nas indústrias que estão acostumadas com produção em grandes escalas. A indústria eletroeletrônica é uma das áreas que sofrem com a produção de pequenas séries. O tempo de preparação das máquinas da linha de montagem de placas de circuito impresso são relativamente grandes devido à sua complexidade. Este processo se torna caro e, muitas vezes, inviável a montagem de poucas unidades. Surge, então, a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias capazes de se adaptarem à alta variedade de produtos num curto período de tempo. Este trabalho teve como objetivo projetar e desenvolver uma máquina capaz de se adaptar às dificuldades da inspeção de placas produzidas em pequenas séries. O seu controle foi desenvolvido independentemente dos algoritmos de inspeção. Desta forma, ela pode atuar em todas as etapas de montagem de uma placa, necessitando apenas do desenvolvimento de novos algoritmos de inspeção e adaptação do sistema de iluminação e de aquisição. Implementada com arquitetura aberta, a máquina pode ser controlada externamente e comunicar-se com outros programas de computadores para agilizar o tempo de *setup*. A máquina desenvolvida se mostrou um forte potencial para a alta cobertura de defeitos, bastando desenvolver novos algoritmos de inspeção. Além disso, o tempo de *setup* é pequeno e fácil de se realizar, potencializando o uso da máquina na produção de pequenas séries.

Palavras-chave: Produção de Pequenas Séries. Placa de Circuito Impresso. Inspeção. Mecatrônica.

ABSTRACT

The growing demand for products increasingly customized gave rise to a new model in the industrial environment, called Small Series Production. Researchers have gathered efforts to minimize the problems caused by this production type in industries that are used to produce in large scales. The electronics industry is one of the areas that suffer from small series production. The preparation time of the assembly line machinery of printed circuit boards are relatively large due to its complexity. This process becomes expensive and often impractical to mount a few units. Then comes the need to develop new technologies able to adapt to the high range of products in a short time. This study aimed to design and develop a machine capable of adapting to the difficulties of inspection plates produced in small series. His control was independently developed algorithms inspection. This way, she can act at all stages of assembling a plate, requiring only the development of new algorithms for inspection and adaptation of the lighting system and acquisition. Implemented with open architecture, the machine can be controlled externally and communicate with other computer programs to speed setup time. The machine proved developed with a strong potential for high defect coverage, simply develop new algorithms inspection. Furthermore, the setup time is small and easy to perform, increasing the use of the machine in producing small.

Keywords: Small Series Production. Printed Circuit Board. Inspection. Mechatronics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dilemas da produção. Fonte: Adaptado (MICHAELI et al, 2007) (BAUHOFF et al, 2010).....	27
Figura 2 - Linha de inspeção de faróis de carro na <i>RWTH Aachen</i>	28
Figura 3 - Foto do laboratório-fábrica LabElectron.....	28
Figura 4 - Linha de montagem SMT do LabElectron.....	29
Figura 5 - Produção mundial de placas de circuito impresso em 2012. Adaptado (TPCA, 2011).....	32
Figura 6 - Placa de face simples.....	34
Figura 7 - Placa de face dupla. Fonte: Adaptado: (FUSETTN, 1999)....	34
Figura 8 - Placa multicamadas. Fonte: Adaptado: (FUSETTN, 1999)....	35
Figura 9 - <i>Through-Hole Technology</i> - (a) <i>Non-Plated Through Hole</i> e (b) <i>Plated Through Hole</i> . Fonte: Adaptado: (FUSE TTN, 1999).....	36
Figura 10 - <i>Surface-Mount Technology</i> Fonte: Adaptado: (FUSE TTN, 1999).....	36
Figura 11 - Principais tipos de encapsulamento de componentes TH (DORO, 2004).....	37
Figura 12 - Esquema de funcionamento de uma máquina de solda. Fonte: (DORO, 2004).....	38
Figura 13 - Equipamentos que compõem uma típica linha de montagem TH Fonte: (DORO, 2004).....	39
Figura 14 - Processos da aplicação da pasta de solda. Fonte: (DORO, 2004).....	39
Figura 15 - Perfil térmico usado na refusão da pasta de solda. Fonte: (DORO, 2004).....	41
Figura 16 - Equipamentos que compõe uma típica linha de montagem SMT.....	41
Figura 17 - Exemplos de defeitos numa placa nua. Fonte: (MOGANTI et al, 1996).....	45
Figura 18 - Gráfico do percentual de defeitos identificados na produção de celulares pelas tecnologias 2D e 3D (Estudo realizado pelo LabElectron).....	46
Figura 19 - SPI – TR7007. Fonte: (TRIINOVATION, 2011).....	47
Figura 20 - AOI - TR7500E. Fonte: (TRIINOVATION, 2011).....	48

Figura 21 - Defeitos após a soldagem dos componentes. Fonte: Adaptado (SMT_IN_FOCUS).....	48
Figura 22 - Defeitos encontrados por uma AXI através da inspeção por Raio-X. Fonte: (TRIINOVATION, 2011).....	49
Figura 23 - AXI – TR7600. Fonte: (TRIINOVATION, 2011).....	50
Figura 24 - Fiducial Local.....	50
Figura 25 - Fiduciais globais e do painel. Fonte: (IPC 7351, 2005).....	51
Figura 26 - Recomendação da forma da marca fiducial. Fonte: (IPC 7351, 2005).....	51
Figura 27 - Diagrama de defeitos na linha de montagem SMT.....	53
Figura 28 - Distribuição dos defeitos em uma PCI. Fonte: (DORO, 2004).....	54
Figura 29 - Etapas de formação das imagens em um sistema de visão (PAVIM; ROLOFF, 2005).....	55
Figura 30 - Amostragem e Quantização dos dados analógicos de uma linha da imagem (PAVIM; ROLOFF, 2005).....	56
Figura 31 - Imagem monocromática e a convenção dos eixos (x,y) (FILHO; NETO, 1999).....	57
Figura 32 - Vizinhança $N_i(p)$, $N_D(p)$ e $N_s(p)$ do <i>pixel</i> $p=0$	57
Figura 33 - Ilustração de caminhos e regiões numa imagem binária. Fonte: (PAVIM; ROLOFF, 2005).....	58
Figura 34 - Possíveis etapas de inspeção da S2iAOI.....	60
Figura 35 - Elementos mecânicos. Fonte: (OBR, 2010).....	63
Figura 36 - Placa de Controle - ADUC84. Fonte: (NOLL, 2009).....	63
Figura 37 - <i>Driver</i> de acionamento do motor de passo. Fonte: (KALATEC, 2011).....	64
Figura 38 - Fonte de Alimentação PMC-24V100W1AA. Fonte: (KALATEC, 2011).....	65
Figura 39 - Modelo CAD da máquina S2iAOI.....	65
Figura 40 - Regra da <i>Java Native Interface</i> . Fonte: Adaptado (LIANG, 1999).....	67
Figura 41 - Juntas Prismáticas da S2iAOI.....	69
Figura 42 - <i>Conveyor</i> : Movimentação da PCI e ajusta da largura.....	70
Figura 43 - Diagrama geral de funcionamento.....	70
Figura 44 - Redução do conjunto de polias dos eixos prismáticos.....	72

Figura 45 - Projeto CAD e montagem do eixo X.....	72
Figura 46 - Esteira do <i>conveyor</i>	73
Figura 47 - Sistema de ajuste da largura do <i>Conveyor</i>	74
Figura 48 - Acoplamento do motor de passo com o fuso de esfera.....	74
Figura 49 - Suporte da Câmera.....	75
Figura 50 - Diagrama de Blocos	76
Figura 51 - Circuito de Intertravamento.....	77
Figura 52 - Circuito de Potência.....	78
Figura 53 - Circuito de amplificação dos sinais para os <i>drivers</i>	78
Figura 54 - Circuito de isolamento e amplificação dos sinais dos módulos.....	79
Figura 55 - Circuito de isolamento e amplificação dos sinais dos homes	79
Figura 56 - Fonte de alimentação.....	80
Figura 57 - <i>Layout</i> da placa de isolamento e amplificação de sinais.....	81
Figura 58 - Entrada dos sinais na placa de controle dos módulos.....	86
Figura 59 - Saída da placa de controle dos módulos.....	86
Figura 60 - <i>Layout</i> da placa de controle dos módulos.....	87
Figura 61 - <i>Layout</i> do módulo de iluminação.....	89
Figura 62 - Esquema de ligação do módulo de iluminação.....	89
Figura 63 - Esquema de ligação entre os módulos.....	90
Figura 64 - Montagem do módulo de iluminação lateral.....	90
Figura 65 - Painel Elétrico da S2iAOI.....	91
Figura 66 - Diagrama dos módulos do software da S2iAOI.....	92
Figura 67 - Interface Gráfica Principal.....	93
Figura 68 - Barra de Ferramentas - GUIP.....	94
Figura 69 - (a) Botão <i>New</i> (b) Botão <i>Home</i>	95
Figura 70 - <i>Axis Position</i> - GUIP.....	95
Figura 71 - <i>Machine Control</i> - GUIP.....	96
Figura 72 - <i>Illumination Control</i> - GUIP.....	96
Figura 73 - <i>Image Editor</i> - GUIP.....	97
Figura 74 - Fluxograma da programação de um defeito na S2iAOI.....	98
Figura 75 - <i>Log Viewer</i> - GUIP.....	98

Figura 76 - <i>Camera Viewer</i> - GUIP.....	99
Figura 77 - Módulos da S2iAOI.....	100
Figura 78 - Interface Gráfica da Calibração.....	101
Figura 79 - Nível do limiar da binarização ajustado para a calibração	102
Figura 80 - Localização do centro da marca fiducial.....	103
Figura 81 - Resultado na calibração na interface gráfica (<i>Calibration Results</i>).....	104
Figura 82 - Interface gráfica do algoritmo <i>Fiducial Finder</i>	105
Figura 83 - Algoritmo <i>Fiducial Finder</i>	105
Figura 84 - Posição zero da placa com três marcas fiduciais.....	106
Figura 85 - Posição zero da placa com duas marcas fiduciais.....	107
Figura 86 - Arquivo de inspeção PCB_ID0V3.aoi simplificado.....	108
Figura 87 - Arquivo de Inspeção: Expansão do nó <i>PCB</i>	108
Figura 88 - Arquivo de Inspeção: Expansão do nó <i>GoldenImages</i>	110
Figura 89 - Arquivo de Inspeção: Expansão do nó <i>Defects</i>	110
Figura 90 - Máquina de Inspeção S2iAOI.....	113
Figura 91 - Forma da marca fiducial utilizada para os testes da S2iAOI	115
Figura 92 - Deslocamento das imagens com a mesma posição de referência. (a) Imagem de referência. (b) (c) (d) Imagens de teste.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de reparo após cada etapa de montagem. Adaptado: (BURR, 1997).....	25
Tabela 2 – Protocolo de comunicação entre o microcontrolador e o computador via interface serial RS-232.....	83
Tabela 3 – Códigos para o acionamento dos módulos de iluminação.....	84
Tabela 4 – Códigos para o acionamento das esteiras do <i>conveyor</i>	85
Tabela 5 – Códigos binários para o acionamento dos módulos de iluminação..	88
Tabela 6 – Dados dos testes da calibração.....	117
Tabela 7 – Dados dos testes das posições das marcas fiduciais.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOI	<i>Automatic Optical Inspection</i> (Inspeção Óptica Automática)
AXI	<i>Automatic X-Ray Inspection</i> (Inspeção Automática por Raio-X)
BRAGECRIM	<i>Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology</i>
CI	Circuito Integrado
COGMET	<i>Cognitive Metrology for Flexible Small Series Production</i>
CLP	Computador Lógico Programável
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
DAS	Departamento de Automação e Sistema
FC	Fim de Curso (Sensor)
GUI	<i>Graphical User Interface</i> (Interface Gráfica)
GUIP	Interface Gráfica Principal
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
JNI	<i>Java Native Interface</i>
MV	<i>Machine Virtual</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
OpenCV	<i>Open Source Computer Vision</i>
PE	Parada de Emergência
PCI	Placa de Circuito Impresso
PPS	Produção de Pequenas Séries
PWM	<i>Pulse Width Module</i>
RWTH	<i>Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule</i>
S2i	Sistema Industrial Inteligente
SMD	<i>Surface-Mount Device</i>

SMT	<i>Surface-Mount Technology</i> (Tecnologia de Montagem em Superfície)
TH	<i>Through-Hole</i> (Através de Furo)
THT	<i>Through-Hole Technology</i> (Tecnologia Através de Furo)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 OBJETIVOS.....	27
1.1.1 Objetivo Geral.....	29
1.1.2 Objetivos Específicos.....	29
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	30
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
2.1 PRODUÇÃO DE PEQUENAS SÉRIES.....	31
2.2 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO.....	32
2.2.1 Tipos de montagem de PCIs.....	33
2.2.1.1 Placa de Face Simples.....	33
2.2.1.2 Placa de Face Dupla.....	34
2.2.1.3 Placa Multicamadas.....	34
2.2.2 Tecnologias de PCIs.....	35
2.2.2.1 Through-Hole Technology.....	35
2.2.2.2 Surface-Mount Technology.....	36
2.2.3 Processos de Montagem de PCIs.....	37
2.2.3.1 Processo de Montagem THT.....	37
2.2.3.2 Processo de Montagem SMT.....	39
2.2.4 Inspeção e Defeitos de PCIs.....	41
2.2.4.1 Defeitos em Placa Nua.....	43
2.2.4.2 Defeitos Após a Aplicação da Pasta de Solda.....	45
2.2.4.3 Defeitos Após a Inserção dos Componentes.....	47
2.2.4.4 Defeitos Após a Soldagem dos Componentes.....	48
2.2.5 Fiduciais.....	50
2.2.6 Síntese.....	52
2.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS.....	54
2.3.1 Propriedades das Imagens.....	54
3 ATRIBUTOS DA S2IAOI E METODOLOGIA DE PROJETO...59	
3.1 ATRIBUTOS.....	60
3.2 METODOLOGIA DE PROJETO.....	61
3.2.1 Projeto Informacional.....	61
3.2.2 Projeto Conceitual.....	62
3.2.2.1 Elementos de estrutura da máquina.....	62
3.2.2.2 Placa de controle – ADUC841.....	63
3.2.2.3 – Driver e motores de passo.....	64
3.2.2.4 – Fonte para os drivers.....	64
3.2.3 Projeto Preliminar.....	65
3.2.4 Projeto Detalhado.....	66
3.3 FERRAMENTAS DE APOIO.....	66
3.3.1 Biblioteca de Visão Computacional.....	66
3.3.2 Linguagens de Programação.....	66

4 IMPLEMENTAÇÃO.....	69
4.1 DIAGRAMA GERAL DE FUNCIONAMENTO.....	70
4.2 CONCEPÇÃO MECÂNICA.....	71
4.2.1 Eixos Prismáticos.....	71
4.2.2 Conveyor.....	73
4.2.3 Suporte da câmera e da iluminação central.....	75
4.3 CONCEPÇÃO ELETROELETRÔNICA.....	75
4.3.1 Diagrama de Blocos.....	75
4.3.2 Circuito de Intertravamento.....	76
4.3.3 Circuito de Potência.....	77
4.3.4 Placa de Isolamento e Amplificação de Sinais.....	78
4.3.4.1 Layout da Placa de Isolamento.....	80
4.3.5 Placa de Controle da S2iAOI.....	82
4.3.5.1 Firmware.....	82
4.3.6 Placa de controle dos módulos de iluminação.....	85
4.3.6.1 Firmware.....	87
4.3.7 Módulo de Iluminação.....	88
4.3.8 Painel Eletroeletrônico.....	91
4.4 SOFTWARE.....	91
4.4.1 Interface Gráfica Principal.....	92
4.4.2 Módulos da S2iAOI.....	99
4.4.3 Algoritmo de Calibração.....	101
4.4.4 Algoritmo Fiducial Finder.....	104
4.4.4.1 Posição zero da placa com três marcas fiduciais.....	106
4.4.4.2 Posição zero da placa com duas marcas fiduciais.....	107
4.4.5 Arquivo XML da inspeção de uma placa.....	107
5 RESULTADOS.....	113
5.1 RESULTADOS DO ALGORITMO CALIBRAÇÃO.....	115
5.2 RESULTADOS DO ALGORITMO FIDUCIAL FINDER.....	116
6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....	119
6.1 PERSPECTIVAS FUTURAS.....	119

1 INTRODUÇÃO

Entre os diversos setores da manufatura, a indústria automotiva e a eletroeletrônica constituem os setores que mais intensamente implantam inovações tecnológicas para aprimorar a produção. É frequente, em tais setores, a necessidade de garantir 0% de falhas nos seus produtos. Para alcançar este objetivo é necessário que 100% dos produtos produzidos sejam inspecionados no mínimo uma vez. Esta inspeção normalmente acontece no final da produção antes da expedição do produto (LIU *et al*, 1996).

Este trabalho se situa no setor eletroeletrônico, onde a conformidade da Placa de Circuito Impresso - PCI possui um efeito direto no desempenho do produto acabado (DVD, *notebook*, *tablet*, etc.). Por esse motivo, a maioria das indústrias do setor eletroeletrônico realizam a inspeção de todas as unidades produzidas de forma automatizada ou manual.

Contudo, isto exige um esforço técnico e econômico que pode afetar diretamente a viabilidade econômica da produção de um lote de um determinado produto. É comum, na indústria eletroeletrônica, a existência do lote mínimo, ou seja, para que a produção de determinada PCI seja realizada é necessária uma quantidade mínima (geralmente centenas de unidades) para que o produto tenha um custo competitivo.

Para assegurar 100% da qualidade com um custo ótimo é preciso inspecionar a PCI após cada uma das etapas da sua manufatura. Quanto mais cedo um defeito for detectado na linha de montagem, menor será o custo para o seu reparo. Uma fórmula para estimar rapidamente estes custos de reparo é a “Regra 10X”, ou seja, a cada X unidades monetárias investidas em cada etapa da manufatura, o custo de reparo será dez vezes o capital investido (BURR, 1997).

Tabela 1 - Valores de reparo após cada etapa de montagem. Adaptado: (BURR, 1997)

<i>Print Failure</i>	\$ 0.50
<i>After Reflow</i>	\$ 5.00
<i>In-Circuit Test</i>	\$ 50.00
<i>Field Failure</i>	\$ 500.00

Outro desafio para as indústrias do setor eletroeletrônico (e para as outras) é a crescente demanda por produtos customizados, que geram lotes cada vez menores de unidades de produtos. Se o tamanho do lote diminui, o tempo de produção também diminui. Isto provoca um aumento no número de lotes diferentes a serem produzidos por turno de trabalho. A mudança de produto acarreta alterações nos parâmetros das máquinas, ou seja, acarreta novos *setups*. E cada *setup* possui um tempo associado, o tempo de *setup*. Hoje, a diversificação dos produtos é tamanha que se pode chegar ao extremo de realizar o *setup* de uma linha de produção para a fabricação de uma única unidade de um produto. Esse cenário de alta diversidade de produtos, com tamanhos de lotes reduzidos (possivelmente unitários) recebe o nome de Produção de Pequenas Séries - PPS (DORO, 2009).

Tornar viável técnica e economicamente a PPS é o desafio do projeto deste trabalho. Este trabalho relata o desenvolvimento de uma Máquina de Inspeção Automática de PCI para atender as características da PPS, pois as soluções existentes no mercado são direcionadas para a produção em escala (lotes grandes e poucas trocas de produto durante a fabricação, *setups* reduzidos). O simples emprego da máquina de inspeção óptica automatizada para a produção em escala não é a melhor solução, tanto do ponto de vista técnico como econômico (MONFARED *et al*, 2006).

A PPS possui dois dilemas que afetam a eficiência dos sistemas de produção no cenário atual das indústrias (SCHUH *et al*, 2007). O primeiro dilema é “escala *versus* escopo”. Se o sistema de produção for projetado para pequenas séries, ele não suportará a produção em grande escala e o mesmo acontecerá se o sistema de produção for projetado para grande escala. O segundo dilema está relacionado com a “orientação ao valor *versus* orientação ao planejamento”. Na produção orientada, o valor foca-se no valor agregado do processo, implicando em menos planejamento, preparação, manipulação e transporte. Por outro lado, a produção orientada ao planejamento foca-se no planejamento do processo, ou seja, visa otimizar o valor agregado à produção por meio de modelagens, simulações e informações acumuladas (SCHMITT; PAVIM, 2008).

A Figura 1 ilustra o desafio de transferir os benefícios da produção em grande escala para a PPS. Neste trabalho, o foco será em aumentar a flexibilidade através da máquina desenvolvida. Entretanto, o aumento da flexibilidade aumenta a distância entre o planejamento e o valor agregado da produção. Para diminuir essa distância, estudos estão

sendo realizados dentro do programa que este projeto está inserido, na área de cognição e autotomização.

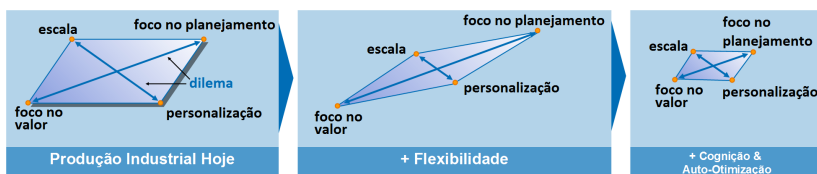


Figura 1 - Dilemas da produção. Fonte: Adaptado (MICHAELI et al, 2007) (BAUHOFF et al, 2010)

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é desenvolver uma máquina automática de inspeção óptica de placas de circuito impresso que atenda as necessidades da produção em pequenas séries, na qual intitula-se de S2iAOI (*Automated Optical Inspection machine from Industrial Intelligent Systems group*).

Um dos requisitos principais do projeto deste trabalho é a flexibilidade das soluções desenvolvidas. Assim, a S2iAOI possui a característica de atuar em diversas etapas da produção de uma PCI (inserção da pasta de solda, inserção de componentes, forno, etc.).

Além disso, outros requisitos foram especificados para a S2iAOI atender ao cenário da PPS satisfatoriamente, a saber:

- fácil *setup* e programação da inspeção de novos produtos;
- alta cobertura de defeitos;
- comunicação com outros sistemas de controle e de qualidade da produção.

Esta dissertação foi desenvolvida dentro do projeto *Cognitive Metrology for Flexible Small Series Production - COGMET - Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology - BRAGECRIM 013/09*, que tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma nova geração de sistemas para metrologia e garantia da qualidade da produção, com capacidades adaptativas e um alto grau de percepção cognitiva relacionada ao produto e ao processo (PFEIFER et al, 2010). Este projeto conta com os seguintes parceiros: CERTI/LabElectron e UFSC/DAS/S2i pelo lado brasileiro e *Rheinisch-*

Westfaelische Technische Hochschule Aachen - RWTH Aachen pelo lado alemão. Atualmente, o projeto COGMET divide-se em dois estudos de casos, visando implementar sistemas autônomos para a produção de pequenas séries em duas linhas de produção distintas:

- **Na Alemanha:** Inspeção automática de superfícies de forma livre, como por exemplo, faróis de carro, tendo como foco os seguintes aspectos: ajuste dos equipamentos de medição e de gravação e análise das características do produto e da fusão de dados de sensores (Figura 2).



Figura 2 - Linha de inspeção de faróis de carro na RWTH Aachen

- **No Brasil:** Investigação da montagem de placas de circuito impresso, focando nos seguintes aspectos: previsibilidade dos indicadores de qualidade, aquisição dos parâmetros dos processos e geração de planos de inspeção e correção (Figura 3).



Figura 3 - Foto do laboratório-fábrica LabElectron.

O LabElectron é um laboratório fábrica que realiza a montagem de placas de circuito impresso com tecnologias THT e SMT. Atualmente, a linha de montagem SMT funciona da seguinte maneira: a pasta de solda é aplicada sobre a placa pela *Printer*, em seguida a placa é inspecionada por uma *SPI* e, então, os componentes são inseridos automática e manualmente, para depois serem soldados através do forno de refusão. Após a soldagem, uma máquina *AOI* realiza novamente a inspeção da placa, finalizando o processo de montagem da placa. A Figura 4 ilustra a atual linha de montagem SMT do LabElectron.

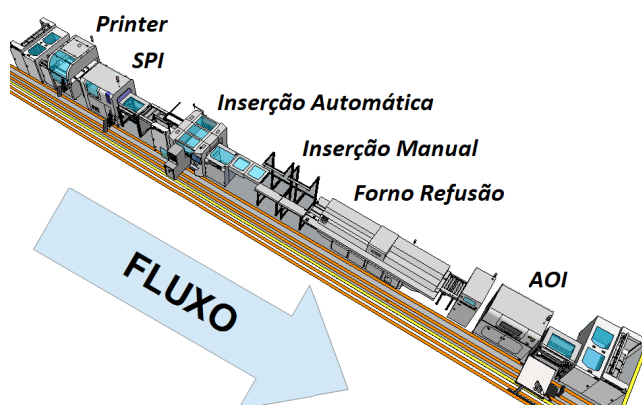


Figura 4 - Linha de montagem SMT do LabElectron

1.1.1 Objetivo Geral

Construir uma máquina de inspeção automatizada de placas de circuito impresso que atenda as necessidades da produção em pequenas séries.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- desenvolver o projeto mecânico e eletroeletrônico;
- desenvolver um algoritmo para controlar a movimentação dos eixos da máquina e do *conveyor*;

- desenvolver uma interface gráfica que não dependa dos algoritmos de inspeção;
- desenvolver algoritmos para referenciar a placa.

Com base nestes objetivos, desenvolveu-se o projeto da máquina de inspeção seguindo a metodologia de projeto fundamentada no projeto informacional, conceitual e detalhado. O desenvolvimento da S2iAOI foi dividido em três abordagens: projeto mecânico, projeto eletroeletrônico e *softwares*. Os projetos foram executados sequencialmente, considerando-se a interconexão com as decisões tomadas anteriormente.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O Capítulo 2 foca-se na fundamentação teórica sobre os assuntos estudados para o desenvolvimento deste trabalho, em especial a produção de pequenas séries, a manufatura, a inspeção de placas de circuito impresso e o processamento digital de imagens.

No Capítulo 3, apresenta-se os atributos da máquina de inspeção,

O Capítulo 4 mostra a proposta e o desenvolvimento da S2iAOI, passando pelo desenvolvimento mecânico, eletroeletrônico e *software*.

Por fim, os resultados são apresentados no Capítulo 5 e, no Capítulo 6, faz-se a conclusão do trabalho e as perspectivas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRODUÇÃO DE PEQUENAS SÉRIES

A crescente demanda dos clientes por produtos cada vez mais personalizados e exclusivos gera um novo desafio para as indústrias. Diminuindo o tamanho do lote a ser produzido, o tempo de produção também é reduzido e, conseqüentemente, o número de lotes produzidos em um turno torna-se maior. Portanto, a flexibilidade acaba sendo um ponto importante para a PPS (DORO, 2009). A linha de produção deve ser capaz de se adaptar rapidamente às mudanças, de acordo com as necessidades dos clientes. A flexibilidade deve ocorrer nos seguintes aspectos (DORO, 2009):

- **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 de aumentar ou reduzir a taxa e o volume de produção.

Não existe uma definição clara e precisa para a PPS, que pode variar de acordo com as perspectivas de cada autor, como em (LIN; LAI; CHANG, 1997), (JADHAV, 2005) e (JURAN et al, 1998) e (WHEELER, 1991). Entretanto, de modo geral, a PPS pode ser definida por um tipo de produção no qual uma grande variedade de produtos são fabricados num curto período de tempo (HITOMI, 1996). As características mais comuns que descrevem o sistema produtivo da PPS são (DORO, 2009):

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

Os valores exatos para as características apresentadas acima não são possíveis de definir para que a produção seja classificada como de pequenas séries. Os valores podem variar significativamente, dependendo do tipo do produto, do ambiente de manufatura, do estágio

de fabricação, do grau de controle sobre o processo, entre outros fatores (DORO, 2009).

Uma linha de produção de pequenas séries deve ser flexível e reconfigurável para produzir corretamente, desde o início da produção. Caso algum erro for detectado, ele deve ser informado ao processo para que possa ser corrigido em tempo de execução. Desta forma, as próximas unidades não apresentarão o mesmo problema. O tempo de configuração (*setup*) deve ser o menor possível e o sistema deve, ainda, receber informações do processo e do produto para extrair os parâmetros ótimos de qualidade para a sua produção.

2.2 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Após a segunda Guerra Mundial, o cientista austríaco Dr. Paul Eisler desenvolveu a primeira PCI. A placa era feita de cerâmica e tinha o conceito parecido com uma placa de face simples (LINK, 1997). Atualmente a PCI sofreu diversas alterações e evoluções tecnológicas e são fabricadas em diversos materiais, sendo que a fibra de vidro é amplamente utilizada na fabricação de placas com multicamadas em aplicações industriais e comerciais.

As placas estão cada vez mais presentes em nossas vidas. São elementos fundamentais em todo e qualquer bem eletroeletrônico, tais como informática, telecomunicações, eletrônica embarcada e automação (DORO, 2004). A maior parte das placas produzidas no mundo atualmente são da China, cerca de 45%. O continente Asiático concentra 75% da produção mundial, a América 6% e Europa 5%. A Figura 5 ilustra a produção mundial de placas de circuito impresso (TPCA, 2011).

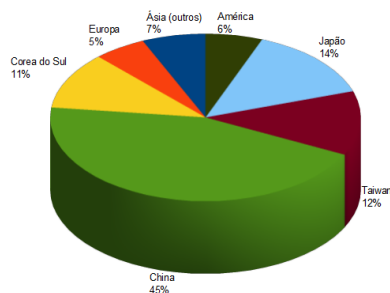


Figura 5 - Produção mundial de placas de circuito impresso em 2012.
Adaptado (TPCA, 2011)

No mercado nacional, a demanda pelo segmento de PCIs vem apresentando um crescimento expressivo. O Brasil apresenta uma crescente competitividade nas placas mais simples, utilizadas na eletrônica de consumo e na eletrônica embarcada automotiva. Entretanto, a maior parte deste mercado tem sido suprida por importações, devido à forte concorrência dos países asiáticos, onde estão localizadas as principais indústrias do setor, que operam em grandes escalas, reduzindo significativamente os preços das placas produzidas (MELO; RIOS; GUTIERREZ, 2001).

Devido a esta forte concorrência, o número de empresas passou de 200 na década de 80 para cerca de 40, atualmente. No entanto, essas empresas estão pulverizadas em pequenas empresas que atuam ao lado de alguns grandes fabricantes, fornecendo, basicamente, placas simples para protótipos e produção de pequenos lotes (MELO; RIOS; GUTIERREZ, 2001).

A seguir, serão apresentadas diferentes tecnologias de PCIs, seus processos de manufaturas e os principais erros ocorrentes.

2.2.1 Tipos de montagem de PCIs

Uma PCI é uma fina placa de material dielétrico onde os componentes eletrônicos são fixados e conectados entre si através de trilhas condutoras, geralmente feitas de cobre em uma ou ambas as faces da placa. Os componentes são soldados nas ilhas, também conhecidas como *pads* que possuem espaços para a junta de solda (FUSETNN, 1999).

Melhoramentos constantes da tecnologia de PCIs tem resultados em diferentes tipos de placas combinadas com novos componentes. Atualmente existem três tipos de placas: placa de face simples, placa de face dupla e multicamadas (FUSETNN, 1999).

2.2.1.1 Placa de Face Simples

A placa de face simples possui numa das faces as trilhas condutoras e na outra face os seus componentes eletrônicos. Eventualmente os componentes podem ser colocados na mesma face das trilhas, dependendo da complexidade da placa. A Figura 6 ilustra a montagem de um componente numa placa de face simples (FUSETNN, 1999).

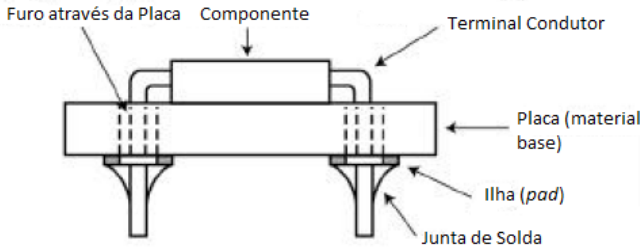


Figura 6 - Placa de face simples
Adaptado: (FUSE TTN, 1999)

2.2.1.2 Placa de Face Dupla

A placa de face dupla possui trilhas condutoras em ambas as faces e os componentes podem ser soldados em qualquer uma das faces. Este tipo de placa aumenta a densidade de componentes se compararmos com a placa de face simples. A ligação das trilhas entre as faces acontece por furos que possuem canais metalizados chamados de vias ou *Planted-Through Hole*. A Figura 7 ilustra um componente montado numa placa de face dupla (FUSE TNN, 1999).

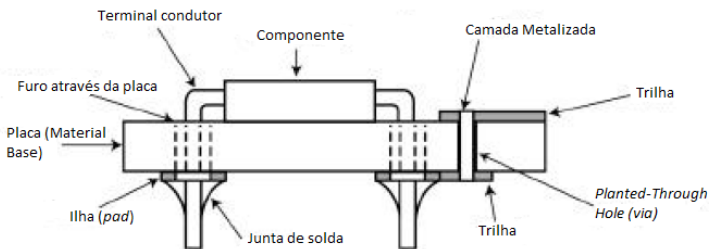


Figura 7 - Placa de face dupla Adaptado: (FUSE TTN, 1999)

2.2.1.3 Placa Multicamadas

As placas multicamadas possuem várias camadas de trilhas, sendo duas delas as faces da placa. As camadas intermediárias se alternam entre camadas com trilhas e camadas com material isolante. A conexão é feita usando *Through* ou *Buried* vias. A *Through-Via* atravessa toda a placa enquanto a *Buried-Via* conecta as trilhas internas. A Figura 8 ilustra uma placa multicamadas (FUSE TNN, 1999).

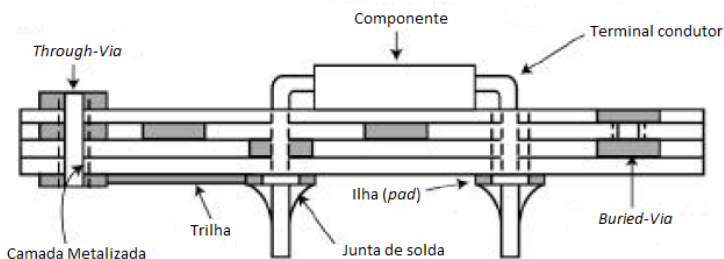


Figura 8 - Placa multicamadas Adaptado: (FUSETTN, 1999)

2.2.2 Tecnologias de PCIs

Existem dois tipos de tecnologias relacionadas à fixação dos componentes na placa. A primeira é a *Through-Hole Technology* - THT no qual os componentes possuem terminais que atravessam a placa através de furos nas ilhas. A segunda é a *Surface-Mount Technology* - SMT no qual os componentes são fixados sobre as ilhas.

2.2.2.1 Through-Hole Technology

A THT consiste em componentes que possuem fios como terminais condutores que atravessam a placa através de furos. Para garantir a conectividade elétrica, esses componentes são soldados, na outra face da placa, nas ilhas (FUSETTN, 1999).

Os primeiros projetos usando esta tecnologia em placas de face simples e face dupla surgiram nos anos 50 e 60, respectivamente. O uso de componentes THT oferece soluções rápidas e fáceis para diversos tipos de projetos. Entretanto, para projetos complexos, o hardware é fisicamente grande e poderá ser eletricamente ruidoso para aplicações em média e alta frequência (FUSETTN, 1999; DORO, 2004). A Figura 9 mostra dois tipos de montagens usando componentes THT.

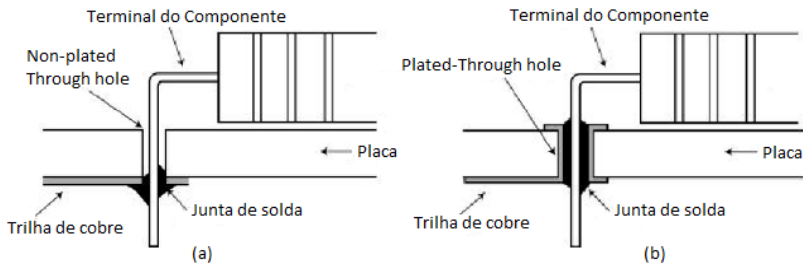


Figura 9 - Through-Hole Technology - (a) Non-Plated through hole e (b) Plated through hole. Fonte: Adaptado: (FUSETTN, 1999)

2.2.2.2 Surface-Mount Technology

Os componentes da SMT não possuem fios como terminais e as ilhas das placas não possuem furos. Os componentes são posicionados em cima da ilha e então soldados, conforme ilustrado na Figura 10 (FUSETTN, 1999).

Esta tecnologia surgiu nos anos 60 e ainda sofre contínuos avanços. No início, os componentes eram similares aos THT, porém os terminais eram cortados e soldados diretamente nas ilhas em cima da placa. Atualmente a distância entre os terminais dos componentes vem sendo reduzida continuamente (FUSETTN, 1999).

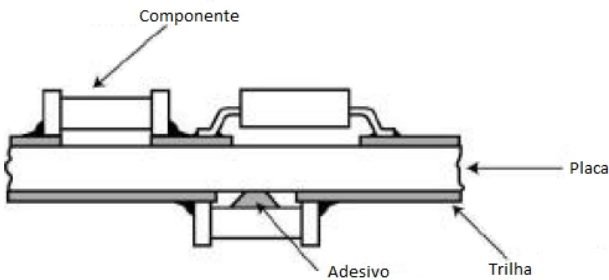


Figura 10 - Surface-Mount Technology
Adaptado: (FUSETTN, 1999)

A tecnologia SMT possibilita uma alta densidade de componentes e suporta um alto desempenho. No entanto, sua manufatura e seus reparos são mais difíceis. Devido a este fato, torna-se necessário alto investimento em

equipamentos automatizados para o processo de manufatura, inspeção e reparos (FUSETNN, 1999).

2.2.3 Processos de Montagem de PCIs

2.2.3.1 Processo de Montagem THT

O processo de montagem de placas de tecnologia *Through-Hole* - THT consiste, basicamente, na inserção e na soldagem dos componentes. Os componentes podem ser inseridos manual ou automaticamente nos furos da placa. Entretanto, as máquinas automatizadas somente são capazes de inserir componentes THT do tipo axial, radial e Circuitos Integrados – CIs (DORO, 2004). A Figura 11 ilustra alguns tipos de encapsulamento de componentes TH.



Figura 11 - Principais tipos de encapsulamento de componentes TH (DORO, 2004)

A inserção manual começa com a pré-formagem dos componentes, onde eles são cortados, dobrados e separados. Em seguida, insere-se os componentes na placa. Na etapa de inserção manual, muitos defeitos podem ocorrer, portanto recomenda-se utilizar máquinas para auxiliarem na posição e orientação dos componentes durante a montagem (DORO, 2004).

Por fim, os componentes são soldados através da máquina de solda por onda. Nesta etapa, a placa é transportada por uma esteira e passa tangencialmente por uma cuba, onde é feita a remoção de impurezas através de um fluxo de produtos químicos específicos. Depois a placa passa por uma zona de preaquecimento para evitar o choque térmico nos componentes e ativar o fluxo (DORO, 2004). Por fim, a placa passa tangencialmente por outra cuba, contendo a liga de solda fundida. Esta liga se adere aos terminais e ilhas da placa, soldando os componentes. Entretanto, o ajuste dos parâmetros da máquina requer um alto grau de conhecimento técnico. Desta forma, a probabilidade de gerar juntas defeituosas é muito alta. (DORO, 2004). A Figura 12 ilustra as etapas de funcionamento de uma máquina de solda.

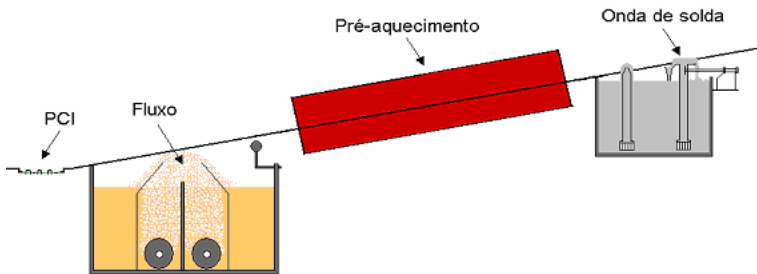


Figura 12 - Esquema de funcionamento de uma máquina de solda. Fonte: (DORO, 2004)

As etapas de montagem THT de uma PCI podem ser observadas na Figura 13.

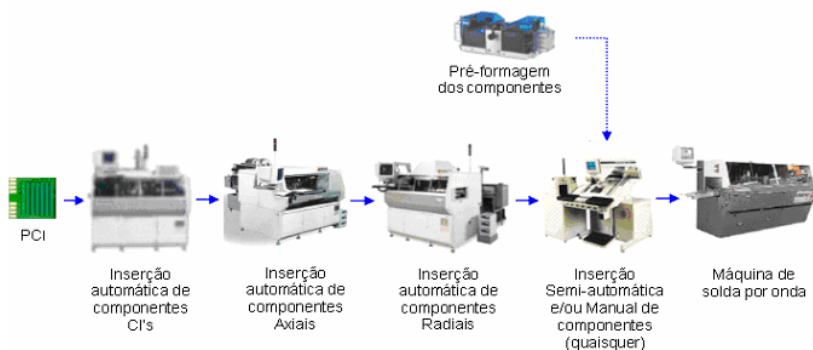


Figura 13 - Equipamentos que compõem uma típica linha de montagem TH
Fonte: (DORO, 2004)

2.2.3.2 Processo de Montagem SMT

O processo de montagem SMT ocorre de forma semelhante à montagem THT. Os componentes *Surface-Mount Device* - SMD podem ser inseridos em máquinas automatizadas ou manualmente. A opção de inseri-los manualmente ocorre, geralmente, na produção em pequenas séries, pois alguns componentes são inseridos em pouca quantidade e vem a granel, impossibilitando a inserção automática deles. Antes de inserir os componentes, uma máquina aplicadora de pasta de solda, conhecida como *Printer*, deposita a pasta sobre as ilhas na superfície da placa. O material da pasta de solda é constituído por uma liga metálica 63%Sn+37%Pb ou 62%Sn+36%Pb+2%Ag) e uma combinação de outros elementos químicos, tais como resina, ativadores, aditivos e solventes (DORO, 2004). Neste processo, a pasta de solda é aplicada por um rodo sobre uma matriz metálica (estêncil) que, por sua vez, permite a passagem da pasta apenas sobre as ilhas. Este processo é ilustrado na Figura 14.

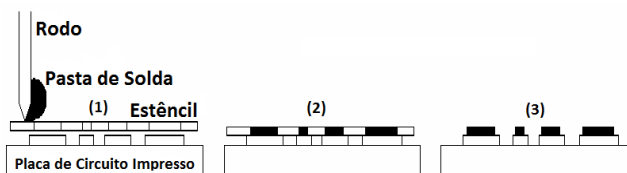


Figura 14 - Processos da aplicação da pasta de solda. Fonte: (DORO, 2004)

A etapa seguinte é a de inserção dos componentes através das máquinas específicas para esta finalidade. Existem basicamente dois tipos de máquinas de inserção de componentes SMT: a *Turret Head* (cabeçote revolver) e a *Pick & Place* (apanhar e inserir). A máquina do tipo *Turret Head* foi desenvolvida para inserir componentes em alta velocidade (10.000 a 60.000 cph – chip por hora), enquanto as máquinas *Pick & Place* conseguem inserir componentes maiores, por exemplo *Ball Grid Array* – BGA, e com maior exatidão na inserção (DORO, 2004).

Por fim, a última etapa consiste na soldagem dos componentes na placa. Esta etapa é realizada por um forno de refusão, que aquece a placa por convecção forçada. Uma esteira transportadora leva a placa por todas as etapas do forno. Cada etapa possui uma temperatura específica, formando um “perfil térmico” do forno, ou seja, a curva de temperatura da placa em função do tempo (Figura 15). Este perfil é formado por quatro fases distintas (DORO, 2004):

- **Preaquecimento:** a temperatura é elevada até o ponto de evaporação dos solventes na pasta de solda;
- **Desgaseificação:** a temperatura é elevada lentamente com o objetivo de ativar o fluxo e igualar a temperatura na placa;
- **Refusão:** a temperatura é elevada para fundir a solda, formando então as juntas de solda;
- **Resfriamento:** a temperatura é reduzida gradativamente até chegar na temperatura ambiente

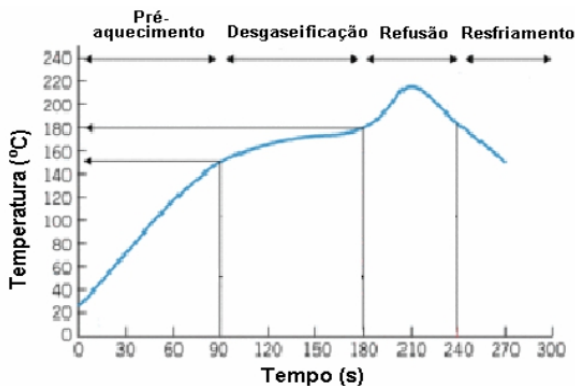


Figura 15 - Perfil térmico usado na refusão da pasta de solda. Fonte: (DORO, 2004).

A Figura 16 ilustra o fluxo de uma típica linha de montagem de placas no processo SMT.

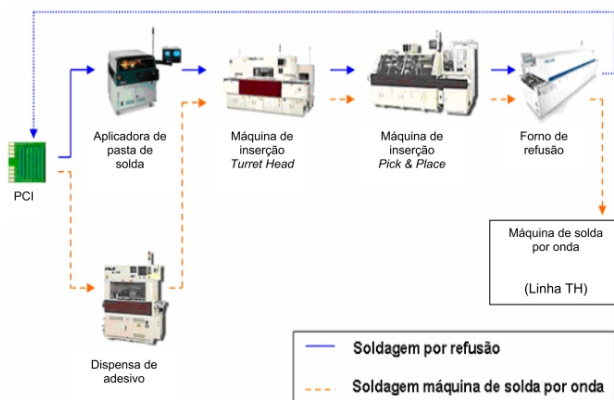


Figura 16 - Equipamentos que compõe uma típica linha de montagem SMT

2.2.4 Inspeção e Defeitos de PCIs

No processo da manufatura, a inspeção industrial possui um papel extremamente importante. É frequente, na maioria dos sistemas, tentar assegurar 100% da qualidade de partes, de subconjunto ou de produtos

finalizados. A qualidade das PCIs tem um efeito significativo no desempenho de um produto eletrônico (WU; WANG; LIU, 1996).

As inspeções feitas por seres humanos monitoram mais de cinquenta etapas requeridas no processo de fabricação de uma PCI. Geralmente eles inspecionam visualmente, seguindo uma norma preestabelecida. Frequentemente, a decisão feita por estes seres humanos envolvem julgamentos subjetivos, além de ser um trabalho cansativo e tedioso. Em contrapartida, as inspeções automáticas removem estes aspectos subjetivos e fornecem uma resposta mais rápida e avaliações quantitativas dimensionais (MOGANTI *et al*, 1996). As avançadas tecnologias da indústria de componentes SMT estão acabando com a inspeção realizada por seres humanos devido à diminuição cada vez mais frequente dos componentes eletrônicos, tornando ainda mais fadigante ou até mesmo impossível, este tipo de inspeção (SUNDARAJ, 2008).

A demanda por uma qualidade cada vez melhor no processo de montagens das PCIs fazem com que os fabricantes de produtos eletrônicos exijam, constantemente, um alto nível de precisão nas inspeções (LIAO; LEE; LAI, 2010). Felizmente os avanços na computação, tais como: alta velocidade de processamento, alta capacidade de armazenamento (memória) e o baixo custo, acompanhado de avanços nos processamentos de imagens, reconhecimento de padrões e inteligência artificial têm contribuído para a diminuição dos custos no desenvolvimento de sistemas de inspeção melhores e mais baratos para a indústria. Sistemas de inspeção automatizados não ficam cansados, não sofrem fadigas e continuam consistentes, trabalhando sem parar dia após dia. Quando colocados em etapas apropriadas no processo de montagem das PCIs, podem reduzir custos adicionais depois da ocorrência de um erro, reduzir os custos do retrabalho e tornar os testes elétricos mais eficientes (MOGANTI *et al*, 1996).

Os principais requisitos que um sistema de inspeção deve satisfazer são: alta velocidade de inspeção, alta precisão na detecção de defeitos e uma pequena faixa de falsos alarmes. Os sistemas de inspeção de PCIs podem ser divididos em duas grandes categorias: (a) Métodos elétricos/com contatos e (b) Métodos não elétricos/sem contato. Os métodos elétricos com contatos podem danificar eletricamente as placas através da aplicação de sinais elétricos, pois pode haver curto-circuitos, componentes danificados, invertidos ou ausentes. Já os métodos não elétricos sem contato, além de não danificarem o produto, apresentam numerosas propostas para a Inspeção Óptica Automatizada (*Automated*

Optical Inspection - AOI). Estas técnicas podem ser divididas em três principais abordagens: Comparação de Referências, Verificação sem Referências e Abordagem Híbrida (LIAO; LEE; LAI, 2010).

Durante as várias etapas da fabricação de uma PCI, diversos defeitos podem ocorrer. Estes defeitos podem ser classificados em três categorias (DORO, 2004):

- Defeitos nos componentes ou placas;
- Defeitos na inserção;
- Defeitos nas terminações.

Os defeitos nos componentes ou placas, geralmente, não são causados durante o processo de fabricação, mas sim pela má qualidade dos componentes ou placas, pelo armazenamento, transporte ou manuseio incorreto. Já os defeitos de inserção são causados durante a etapa de inserção manual ou automática dos componentes. Finalmente, os defeitos nas terminações são causados durante o processo de soldagem. Estes defeitos podem estar relacionados com a aplicação da pasta de solda, parâmetros errados do forno de refusão, ou ainda, orientação e espeçamento dos componentes.

Portando, a inspeção das placas de circuito impresso deve acontecer em todas as etapas de sua fabricação, desde a placa nua até a placa com todos os componentes soldados. Desta forma, é possível garantir 100% da qualidade e, caso haja algum problema nas etapas iniciais, reduzir os custos de reparos.

2.2.4.1 Defeitos em Placa Nua

A fabricação da placa de circuito impresso interfere muito no produto final, portanto, é necessário garantir a qualidade da placa antes mesmo de se inserir e soldar os componentes eletrônicos. Defeitos como curto-circuito, condutor interrompido, excesso ou falta de cobre nas trilhas são alguns exemplos de defeitos que podem ser encontrados ainda na placa nua.

Normalmente as inspeções das placas nuas são feitas pelas empresas responsável por sua fabricação. Desta forma, a empresa que monta PCI não executa este tipo de inspeção. A seguir, uma breve descrição dos defeitos encontrados numa placa nua e, na Figura 17, pode-se observar os principais defeitos encontrados numa placa nua.

- **Breakout:** Ocorre quando o furo da ilha foi deslocado;
- **Pin Hole:** Ocorre quando há um "buraco" (falta de cobre) na trilha/ilha;
- **Open Circuit:** Ocorre quando há o rompimento total da trilha;
- **Underetch:** Ocorre quando a trilha/ilha está maior do que o projetado;
- **Mousebite:** Ocorre quando a trilha/ilha está parcialmente rompida;
- **Missing Conductor:** Ocorre quando há ausência da trilha;
- **Spur:** Ocorre quando há respingos de cobre na placa;
- **Short:** Ocorre quando há curto-circuito entre as trilhas e/ou ilhas;
- **Wrong Size Hole:** Ocorre quando o tamanho do furo está errado;
- **Conductors too close:** Ocorre quando os condutores estão muito próximos um do outro;
- **Spurious copper:** Ocorre quando há presença de cobre num local onde não era para ter;
- **Excessive Short:** Ocorre quando há uma segunda trilha entre dois *pads* ou entre um *pad* e uma trilha;
- **Missing Hole:** Ocorre quando há a falta de furo para o componente;
- **Overetch:** Ocorre quando as trilhas ou ilhas estão com pouco cobre.

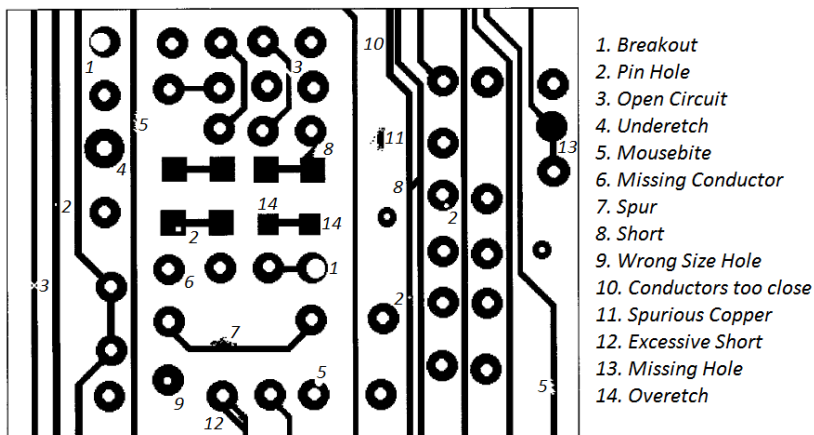


Figura 17 - Exemplos de defeitos numa placa nua. Fonte: (MOGANTI et al, 1996)

2.2.4.2 Defeitos Após a Aplicação da Pasta de Solda

A etapa de aplicação de pasta de solda na placa é a mais crítica na linha de montagem para o controle da qualidade de uma PCI (BURR, 1997). Estima-se que cerca de 60% dos defeitos em uma PCI são causados nesta etapa (DA *et al*, 1998). Um estudo realizado por um fabricante de uma máquina de inspeção de pasta de solda mostra que apenas 41% dos defeitos na aplicação da pasta podem ser detectados por uma inspeção em 2D e 100% por uma inspeção em 3D. A Figura 18 ilustra um gráfico com os defeitos encontrados por uma inspeção 2D e 3D.

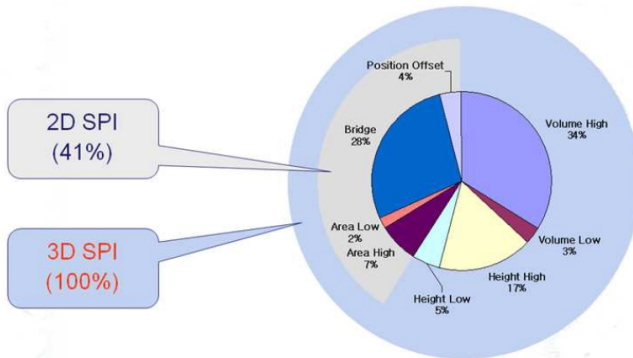


Figura 18 - Gráfico do percentual de defeitos identificados na produção de celulares pelas tecnologias 2D e 3D (Estudo realizado pelo LabElectron)

Os defeitos encontrados na inspeção da pasta de solda são descritos a seguir:

- **Position Offset:** Ocorre quando há um deslocamento da pasta aplicada na placa;
- **Bridge:** Ocorre quando há uma indevida união da pasta de solda entre dois *pads* da placa;
- **Area Low/High:** Ocorre quando a área da pasta depositada é menor/maior do que a necessária;
- **Volume Low/High:** Quando o volume da pasta depositada é menor/maior do que o necessário;
- **Height Low/High:** Quando a altura da pasta depositada está abaixo/acima da especificação.

As máquinas que realizam a inspeção da pasta de solda são conhecidas no mercado por *Solder Paste Inspection* – SPI. Essas máquinas, geralmente realizam a inspeção 3D da pasta, abrangendo 100% dos defeitos possíveis. A Figura 19 mostra a SPI TR7007 da empresa *TRI Innovation*.



Figura 19 - SPI – TR7007. Fonte: (TRIINOVATION, 2011)

2.2.4.3 Defeitos Após a Inserção dos Componentes

Nesta etapa, os componentes eletrônicos podem ser inseridos manual ou automaticamente. Segundo a empresa LABelectron, a inserção manual dos componentes costuma apresentar mais defeitos do que os inseridos automaticamente. A seguir, uma breve descrição dos possíveis defeitos encontrados após a inserção manual ou automática dos componentes.

- **Missing:** Ocorre quando há ausência do componente;
- **Wrong:** Ocorre quando o componente inserido está trocado;
- **Polarity:** Ocorre quando o componente foi inserido com a polaridade invertida;
- **Shift:** Ocorre quando o componente está deslocando em relação à posição correta.

É importante que estes erros sejam descobertos antes da placa entrar no forno de refusão e soldá-los, pois o custo de reparo torna-se muito mais barato. As máquinas que realizam a inspeção nesta etapa são conhecidas como AOI. Para a identificação destes defeitos, usa-se apenas uma câmera de topo e sistemas de iluminação que variam conforme o fabricante. A Figura 20 mostra a AOI da empresa *TRI Innovation*.



Figura 20 - AOI - TR7500E. Fonte: (TRIINOVATION, 2011)

2.2.4.4 Defeitos Após a Soldagem dos Componentes

Após a soldagem dos componentes pelo forno de refusão, as placas podem apresentar uma série de defeitos, normalmente causados pelas etapas anteriores e que não foram identificados em suas respectivas inspeções. Portanto, é importante que toda a placa seja inspecionada após esta etapa para garantir 100% da qualidade no produto finalizado. Além dos defeitos identificados na etapa anterior (*Missing*, *Wrong*, *Polarity* e *Shift*), os seguintes defeitos (Figura 21) também são encontrados nesta etapa:

- ***Insufficient/Excess solder***: Ocorre quando há insuficiência ou excesso de solda;
- ***Bridge***: Ocorre quando há um curto-circuito entre duas juntas de solda;
- ***Skew***: Ocorre quando há um deslocamento do componente, geralmente causado pelo processo de soldagem.

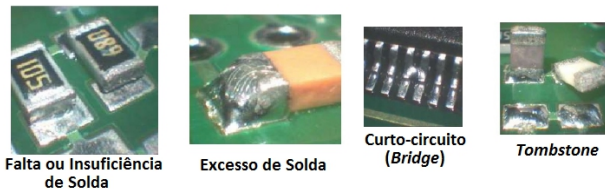


Figura 21 - Defeitos após a soldagem dos componentes.
Fonte: Adaptado (SMT_IN_FOCUS)

As máquinas AOI existentes no mercado também servem para inspecionar as placas nesta etapa. Para isto, elas contam com uma série de câmeras, posicionadas de tal forma que conseguem inspecionar as juntas de solda. O sistema de iluminação, que também varia de acordo com o fabricante, são fundamentais para a identificação destes erros.

Alguns defeitos que ocorrem durante e após o processo de soldagem não podem ser detectados por uma AOI. Para isto, usa-se máquinas de raio-X, conhecidas por *Automatic X-ray Inspection* - AXI que são capazes de inspecionar juntas de solda que ficam obstruídas pelos componentes. Estas máquinas também são capazes de inspecionar dentro das juntas de soldas, identificando os seguintes defeitos:

- **Solder Ball:** Bolas de solda que se agrupam pela placa e ao redor do componente;
- **Tombstone:** Ocorre quando somente um dos lados do componente foi soldado;
- **Non-wetting:** Não molhamento, normalmente ocasionado pela oxidação do terminal do componente;
- **Lifted Lead:** Ocorre quando o(s) terminal(ais) do componente está(ão) levantado(s);
- **Void:** Buracos nas juntas de solda.

A Figura 22 ilustra alguns defeitos listados acima, identificados por uma máquina AXI e a Figura 23 mostra a AXI da *TRI Innovation*, TR7600.

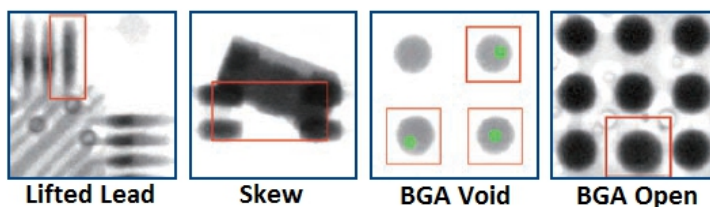


Figura 22 - Defeitos encontrados por uma AXI através da inspeção por Raio-X. Fonte: (TRIINNOVATION, 2011)



Figura 23 - AXI – TR7600. Fonte: (TRIINOVATION, 2011)

2.2.5 Fiduciais

As fiduciais de uma PCI são pontos capazes de serem identificados por sistemas de visão e servem para referenciar placas e componentes. Estas marcas são criadas acompanhando o *layout* da placa (IPC7351, 2005).

Existem três tipos básicos de marcas fiduciais (IPC7351, 2005):

- **Fiducial Global (*Global Fiducial*):** Estas marcas são usadas para referenciar todos os componentes numa única placa;
- **Fiducial do Painel (*Panel Fiducial*):** Estas marcas são utilizadas para referenciar painéis que contêm mais de uma placa.
- **Fiducial Local (*Local Fiducial*):** Alguns componentes requerem maior precisão durante a sua inserção e, para isto, são referenciados pelas marcas fiduciais locais (Figura 24).

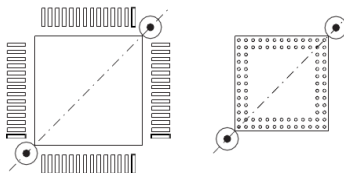


Figura 24 - Fiducial Local

Pelo menos duas marcas fiduciais são necessárias para referenciar a placa, encontrando as posições X e Y e o ângulo de rotação¹ θ . Estas marcas devem ficar em diagonais opostas e o mais distante possível uma da outra.

A norma IPC 7351 recomenda o uso de três marcas fiduciais para um bom projeto de uma placa. Essas três marcas devem estar posicionadas formando um triângulo reto e devem estar o mais distante possível uma da outra. A Figura 25 ilustra o posicionamento das marcas fiduciais globais e locais.

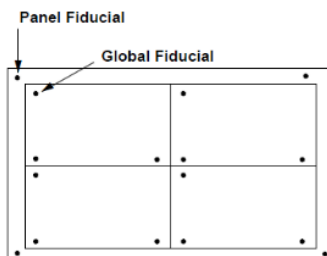


Figura 25 - Fiduciais globais e do painel. Fonte: (IPC 7351, 2005)

A norma IPC 7351 também recomenda que a marca fiducial seja um círculo de cobre de raio R e, em volta, uma área livre de qualquer outra marca deve ser de 2R, conforme ilustrado na Figura 26.

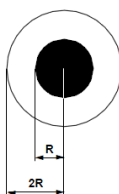


Figura 26 - Recomendação da forma da marca fiducial. Fonte: (IPC 7351, 2005)

-
- 1 Para calcular o ângulo θ usando duas marcas fiduciais é necessário conhecer as distâncias entre elas através do arquivo *pick&place* (gerado para máquinas de inserção de componentes). Neste trabalho não se utilizou este tipo de arquivo, portanto, para duas marcas fiduciais, o algoritmo *Fiducial Finder* (apresentado na Seção 4.4.4) consegue encontrar apenas a posição X e Y da placa.

Entretanto, existem outras formas para uma marca fiducial, como por exemplo, cruz simples (*simple cross*), cruz dupla (*double cross*), quadrada, entre outras.

2.2.6 Síntese

Nesta subseção, foram apresentados os tipos de placas e suas tecnologias de montagem. Basicamente existem dois tipos de tecnologias de montagens de PCI: a tecnologia THT e a SMT. Além disso, os diversos tipos de defeitos que uma PCI pode apresentar durante o seu processo de montagem SMT foram apontados. A Figura 27 representa um diagrama que resume todos os principais defeitos e as tecnologias para detectá-los.

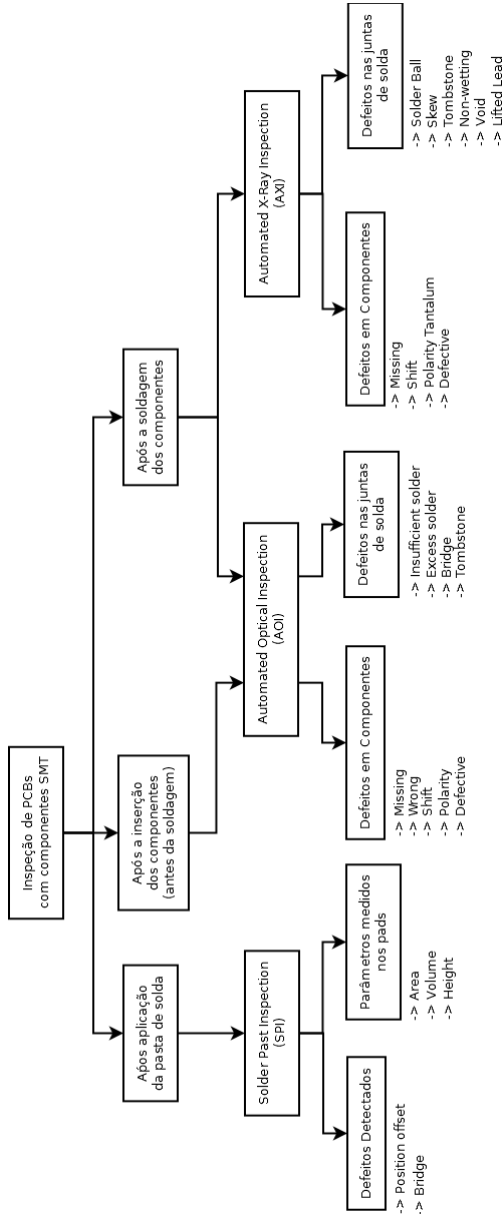


Figura 27 - Diagrama de defeitos na linha de montagem SMT

Estes defeitos não acontecem na mesma proporção, pois dependem de uma série de fatores, tais como processo, materiais e componentes utilizados (DORO, 2004). A Figura 28 ilustra um gráfico com as distribuições dos defeitos mais comuns na tecnologia SMT.

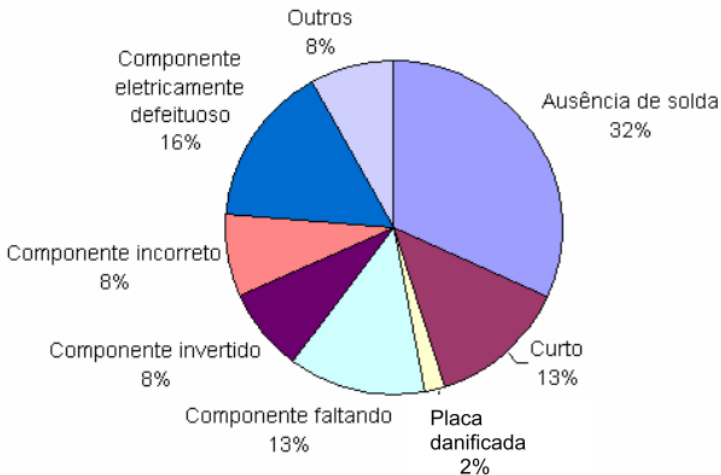


Figura 28 - Distribuição dos defeitos em uma PCI. Fonte: (DORO, 2004)

2.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS

2.3.1 Propriedades das Imagens

As imagens digitais armazenadas em um computador podem ser consideradas funções bidirecionais da forma $f(x,y)$. O valor de amplitude f nas coordenadas x,y é um valor inteiro não-nulo e positivo, conforme mostra a Equação 1, e representa o nível de intensidade luminosa fornecida por uma fonte real (GONZALES; WOODS, 2009).

$$0 < f(x,y) < \infty \quad (1)$$

A função $f(x,y)$ pode ser descrita por dois componentes: (1) a quantidade de iluminação da fonte que incide na cena que está sendo vista; e (2) a quantidade de iluminação refletida pelos objetos na cena. Respectivamente, a iluminância pode ser representada por $i(x,y)$ e a refletância por $r(x,y)$ (GONZALES; WOODS, 2009). Essas duas

funções combinadas como um produto forma a função $f(x,y)$, conforme pode ser visto na Equação 2.

$$f(x,y) = i(x,y)r(x,y) \quad (2)$$

A refletância assume valores entre zero (0), quando há absorção total, e um (1) quando há refletância total da luz e são determinados pelas características dos objetos na cena. Já a iluminância assume valores não-nulos positivos e são determinados pela fonte de iluminação (GONZALES; WOODS, 2009). Os valores para $i(x,y)$ e $r(x,y)$ podem ser observados nas Equações 3 e 4.

$$0 < i(x,y) < \infty \quad (3)$$

$$0 < r(x,y) < 1 \quad (4)$$

As imagens digitais são geradas com os sinais capturados pelos sensores das câmeras. Entretanto, os sinais consistem, normalmente, em uma forma de onda de tensão contínua que necessitam ser digitalizados, para a imagem ser salva na memória do computador. Para converter esses dados contínuos que foram capturados para o formato digital são envolvidos dois processos: amostragem e quantização. A Figura 29 mostra as etapas de formação das imagens em um sistema de visão.

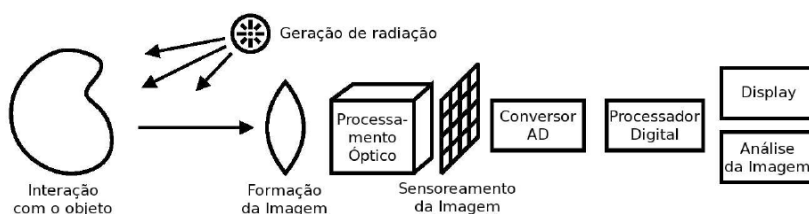


Figura 29 - Etapas de formação das imagens em um sistema de visão (PAVIM; ROLOFF, 2005)

A amostragem consiste em pegar amostras de pontos dos dados contínuos do sensor em distâncias equidistantes ao longo dos eixos vertical e horizontal da imagem, enquanto a quantização extrai os valores de intensidade luminosa nestes pontos amostrados (PAVIM; ROLOFF, 2005). A resolução das imagens está diretamente ligada aos processos de amostragem e quantização. Quanto maior o número de

pontos amostrados, maior será a resolução espacial da imagem. Da mesma forma, quanto maior o número de níveis de intensidade luminosa da quantização, maior será a resolução de tonalidades da imagem (PAVIM; ROLOFF, 2005). A Figura 30 ilustra o processo de amostragem e quantização de um sinal analógico, transformando-o num sinal digital.

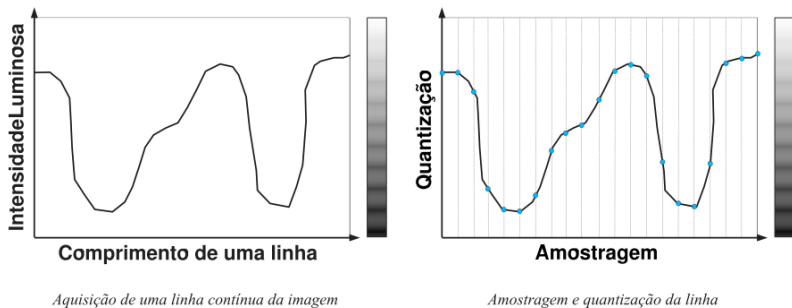


Figura 30 - Amostragem e Quantização dos dados analógicos de uma linha da imagem (PAVIM; ROLOFF, 2005)

Uma imagem pode ser representada na forma matricial, possuindo M linhas e N colunas. Sendo que o ponto inicial é representado por $f(0,0)$ e seu ponto final por $f(M-1,N-1)$. Os demais pontos intermediários estão dispostos segundo mostra a Equação 5.

$$f(x,y) = \begin{pmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{pmatrix} \quad (5)$$

A partir da Equação 5, é possível notar que todas as operações com matrizes podem ser aplicadas para o processamento das imagens. A Figura 31 ilustra uma imagem monocromática e a convenção, utilizada por diversos autores da área, dos eixos (x,y) . A seguir, uma breve descrição sobre algumas propriedades e relacionamentos entre os *pixels*² internos de uma vizinhança: vizinhança, adjacência, conectividade, região e limite.

2 **Pixel**: Elemento da imagem digital.

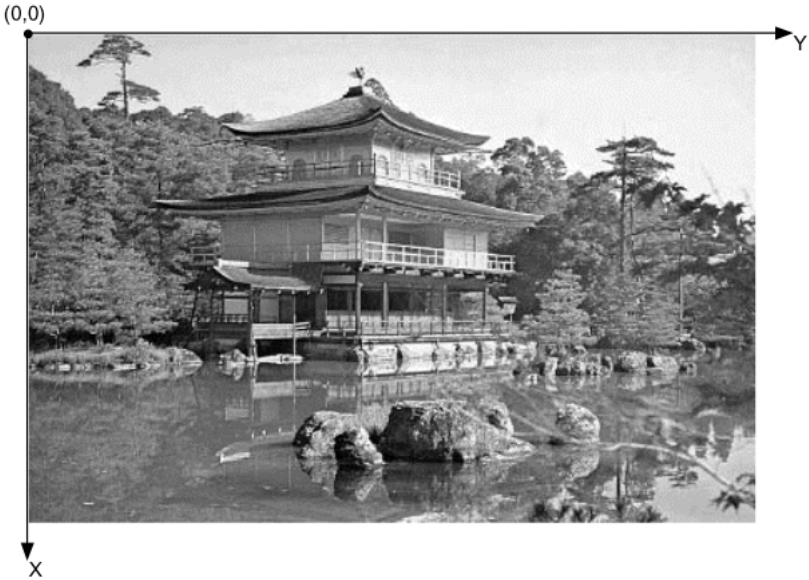


Figura 31 - Imagem monocromática e a convenção dos eixos (x,y) (FILHO; NETO, 1999)

Um *pixel* p de uma imagem digital na coordenada (x,y) possui quatro vizinhos nas coordenadas $(x+1,y)$, $(x-1,y)$, $(x,y+1)$ e $(x,y-1)$. Esses conjuntos de *pixels* são chamados de *vizinhança-4* de p , e é expresso por $N_{4(p)}$. Na diagonal, os vizinhos de p possuem as seguintes coordenadas: $(x+1,y+1)$, $(x+1,y-1)$, $(x-1,y+1)$ e $(x-1,y-1)$. Esses *pixels* são expressados por $N_{D(p)}$. Os dois conjuntos juntos de *pixels* apresentados formam outro conjunto, denominado $N_{8(p)}$, que engloba todos os *pixels* vizinhos de p . A Figura 32 mostra as vizinhanças $N_{4(p)}$, $N_{D(p)}$ e $N_{8(p)}$ do *pixel* $p=0$.

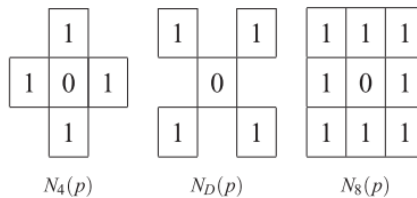


Figura 32 - Vizinhança $N_{4(p)}$, $N_{D(p)}$ e $N_{8(p)}$ do *pixel* $p=0$

O conceito de adjacência pode ser definido a partir do conceito de vizinhança. O *pixel* q é adjacente do *pixel* p quando se encontra na vizinhança de p e possui semelhança ou afinidade de intensidade luminosa com p . Essa semelhança ou afinidade ocorre quando os valores da intensidade luminosa estão dentro de uma faixa pré-determinada (PAVIM; ROLOFF, 2005).

Dado um conjunto de *pixel* S numa imagem, dois *pixels*, p na coordenada (x,y) e q na coordenada (u,v) , serão conexos quando entre eles houver um caminho de *pixels* adjacentes ligando-os, todos pertencentes ao conjunto S . De forma semelhante, um conjunto R numa imagem só poderá ser considerada uma região da imagem caso todos seus *pixels* sejam conexos e formarem um conjunto completo conectado. Para finalizar, define-se o limite L de uma região R como sendo o conjunto de *pixels* de R que possuem um ou mais vizinhos não-pertencentes ao conjunto R (PAVIM; ROLOFF, 2005).

Figura 33 ilustra os conceitos apresentados acima. Para o conjunto S é possível notar que existe uma conexão entre os *pixels* p_1 e p_2 caso ambos tenham valor 0, da mesma forma haverá conectividade entre os *pixels* q_1 e q_2 caso ambos tenham valor 1. Já o conjunto R será declarado como região se os *pixels* p_3 e p_4 tiverem valor 0, concretizando uma conexão completa de todos os *pixels* do conjunto (PAVIM; ROLOFF, 2005).

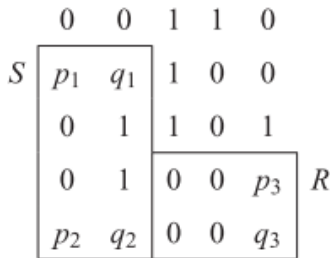


Figura 33 - Ilustração de caminhos e regiões numa imagem binária (PAVIM; ROLOFF, 2005)

3 ATRIBUTOS DA S2IAOI E METODOLOGIA DE PROJETO

A máquina de inspeção desenvolvida neste trabalho tem como principal objetivo ser capaz de atuar em todas as etapas possíveis de inspeção na linha de montagem SMT do LabElectron, conforme ilustra a Figura 34. Para atingir este objetivo, a máquina deve ser bastante flexível, possibilitando a instalação de novos sistemas de iluminação e de aquisição de imagens e algoritmos de inspeção. Além disso, ela deverá fornecer os resultados das inspeções para sistemas especialistas³ que, junto com os dados do processo, diagnosticará as possíveis causas das falhas encontradas durante o processo de manufatura, e outros agentes⁴ decidirão o que fazer para que o processo de manufatura corrija as falhas em tempo real, ajustando as máquinas de manufatura e, inclusive, a máquina de inspeção. Deste modo, as próximas placas já serão produzidas com as devidas correções, minimizando o tempo de *setup* das máquinas.

3 O sistema especialista foi desenvolvido por (VARGAS, 2012). Entretanto, ainda não houve a integração da máquina S2iAOI com este trabalho.

4 Este trabalho está sendo desenvolvido por um doutorando do programa BRAGECRIM na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/Departamento de Automação e Sistemas – DAS/Grupo de Pesquisa Sistemas Industriais Inteligentes – S2i.

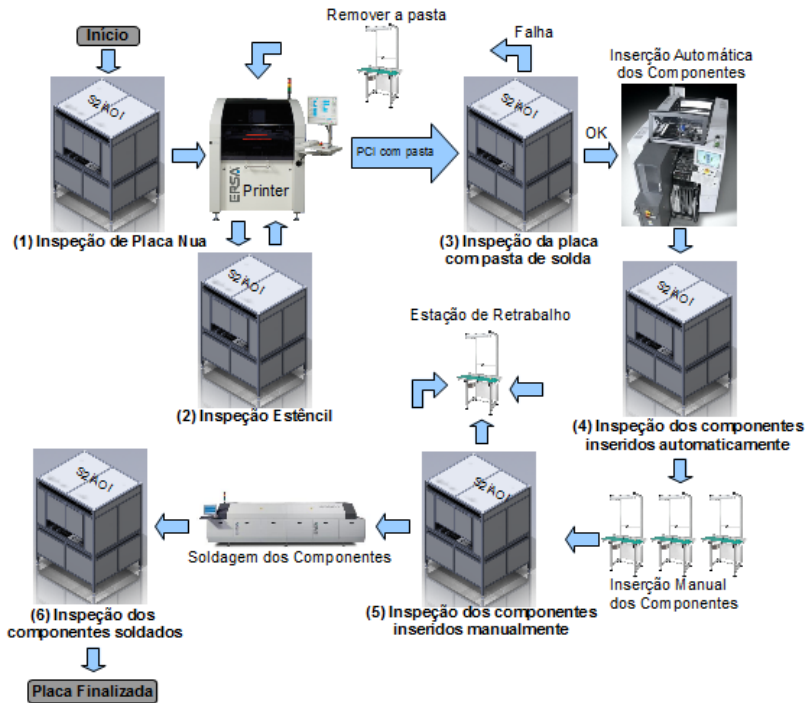


Figura 34 - Possíveis etapas de inspeção da S2iAOI

3.1 ATRIBUTOS

Para que a máquina seja capaz de atuar em todas as etapas citadas acima e consiga inspecionar PCIs produzidas em pequenas séries com maior rapidez do que as máquinas atuais de inspeção para grandes séries, é necessário que ela atenda os seguintes atributos:

Movimentação no chão de fábrica: A S2iAOI deve possuir uma fácil mobilidade no chão de fábrica, permitindo a sua movimentação entre as etapas da linha de montagem SMT;

Integração com as outras máquinas: A altura do *conveyor* deve ser compatível com a altura dos *conveyors* das outras máquinas, para que haja uma alimentação automática de placas;

Ajuste automática da largura do conveyor: O *conveyor* da S2iAOI deve possuir um sistema de ajuste de sua largura automático,

permitindo a inspeção de placas com larguras que variem de *50mm* a *500mm*;

Adaptação dos Sistemas de Aquisição e de Iluminação: A troca e/ou acoplamento de mais câmeras e a troca do sistema de iluminação deve ocorrer de forma fácil e rápida. Desta forma, é possível atender as necessidades particulares dos algoritmos de inspeção;

Inclusão de algoritmos de inspeção: A inclusão dos algoritmos de inspeção deve ocorrer como se fosse um *plug-in*. Desta forma, a movimentação dos eixos e do *conveyor*, controle da iluminação e aquisição de imagem não podem depender dos algoritmos de inspeção instalados na máquina.

Interface Gráfica Principal: Esta interface gráfica deve ser amigável e fácil de usar, para que o usuário possa criar programas de inspeção, calibrar, encontrar o ponto zero da máquina, através das marcas fiduciais, de forma intuitiva;

Arquitetura aberta: O desenvolvimento da máquina deve ocorrer em plataformas abertas, permitindo sua contínua atualização, tanto de *hardware* quando de *software*.

Possibilidade de Agentificação⁵: A S2iAOI deve permitir a inserção de um agente para controlá-la total e/ou parcialmente. Para isto, os dados do *status* da máquina e os dados de inspeção devem estar num formato que seja possível transferi-los e editá-los por outro agente, havendo uma interação entre eles.

3.2 METODOLOGIA DE PROJETO

Para desenvolver a máquina de inspeção seguiu-se a metodologia de projeto baseada no Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Preliminar e Projeto Detalhado (BACK, 1983).

3.2.1 Projeto Informacional

Nesta etapa, buscou-se informações sobre as necessidades do laboratório fábrica LabElectron no desenvolvimento de uma máquina de inspeção de PCI na sua linha de produção de pequenas séries. Segundo o LabElectron, os defeitos causados após a inserção manual de componentes SMD (*missing*, *polarity*, *shift* e *wrong*) são as principais causas de placas defeituosas.

5 Agentificação: Termo utilizado para a ação de tornar um *software* em Agentes

Como a inspeção deles, atualmente, é feita por uma AOI após a soldagem dos componentes, o custo de reparo acaba sendo muito elevado, levando em consideração que tais defeitos poderiam ser corrigidos antes da soldagem, se fossem identificados a tempo.

Outro problema citado pelo LabElectron foi a dificuldade e o tempo gasto para fazer as configurações da AOI para inspecionar o lote de uma placa. Como é necessário muito tempo para fazer os ajustes ideais para a inspeção, eles acabam relaxando nos parâmetros das configurações. Devido a este relaxamento, os níveis de falso positivos⁶ são bastante elevados.

Após obter as informações sobre as necessidades e dificuldades do LabElectron elaborou-se o projeto conceitual de uma máquina de inspeção de PCIs, buscando soluções que atendam os requisitos já citados.

3.2.2 Projeto Conceitual

Na etapa do projeto conceitual, desenvolveu-se as soluções dos requisitos encontrados na etapa anterior e, conseqüentemente, definiu-se os elementos mecânicos e dispositivos eletroeletrônicos que constituiriam a máquina de inspeção.

A seguir serão apresentados os principais elementos e dispositivos selecionados para o projeto da S2iAOI.

3.2.2.1 Elementos de estrutura da máquina

Para montar a estrutura da máquina de inspeção, procurou-se elementos mecânicos que fossem de fácil acesso no mercado brasileiro, padronizados e de fácil montagem. Tomando por base esses requisitos, escolheu-se perfis extrudados de alumínio para esta finalidade.

Os perfis de alumínio são de fácil montagem e integração com outros elementos padronizados essenciais para a montagem da máquina, tais como guia linear, fuso de esfera, mancal, entre outros. A Figura 35 ilustra alguns desses elementos citados.

⁶ **Falso positivo:** Termo utilizado quando um produto é aprovado por uma inspeção, entretanto, apresenta erros que não foram detectados, gerando um produto com falhas.



Figura 35 - Elementos mecânicos. Fonte: (OBR, 2010)

3.2.2.2 Placa de controle – ADUC841

A placa de controle da S2iAOI foi desenvolvida pelo professor Valdir Noll do Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC. O microcontrolador ADUC841 é usado para realizar o processamento, leitura dos sensores e comando dos *drivers* dos motores de passo (geração dos pulsos de *step* e *dir*). As principais funções deste controlador são (NOLL, 2009):

- Sistema microcontrolador desenvolvido para controle de processos, baseado no microcontrolador ADuC841, da *Analog Device*;
- Entrada e Saídas programáveis (Digitais e Analógicas);
- Saídas *Pulse Width Module* - PWM;
- Amplificador de instrumentação AD621;
- Porta de comunicação serial RS-232;
- Interrupções externas.

A Figura 36 apresenta uma imagem da placa de controle.

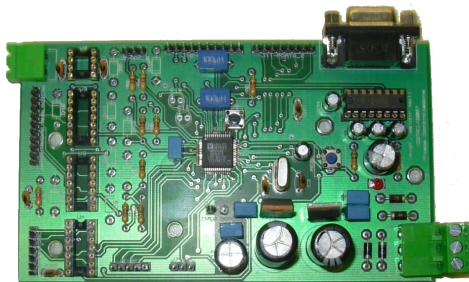


Figura 36 - Placa de Controle - ADUC84. Fonte: (NOLL, 2009)

3.2.2.3 – *Driver* e motores de passo

Os motores de passos selecionados são padronizados e sua flange para montagem é padronizada pela *National Electrical Manufacturers Association* - NEMA. Dois tipos de motores foram selecionados para este projeto. Um com um torque um pouco menor do que o outro. O de menor torque é utilizado para as esteiras do *conveyor* e, o de maior torque, para os eixos da máquina.

Para o acionamento dos motores de passo escolheu-se o *driver* STR8. O modo de controle deste *driver* é pulso/direção (*step/dir*) e possui entradas e saídas isoladas opticamente. Este *driver* é compatível com os motores utilizados na máquina e, para selecioná-los, basta alterar as chaves de seleção de motores.

Além de ser de baixo custo e robusto, e possuindo entradas e saídas isoladas opticamente, permite resoluções de 200, 400, 2000, 12800 e 20000 passos por volta, também selecionados através de chaves. Sua operação é de 24 a 75 volts contínuos, com correntes de até 7,8A por fase. A Figura 37 mostra uma imagem do *driver* utilizado.



Figura 37 - *Driver* de acionamento do motor de passo.
Fonte: (KALATEC, 2011)

3.2.2.4 – Fonte para os *drivers*

A fonte foi selecionada para que fosse compatível com o *driver* de acionamento dos motores. Ela fornece uma tensão de 24V e uma corrente de 4,16A totalizando uma potência de aproximadamente 100W. Esta fonte é sugerida pelo fornecedor dos *driver*. A Figura 38 mostra a fonte utilizada.



Figura 38 - Fonte de Alimentação PMC-24V100W1AA. Fonte: (KALATEC, 2011)

3.2.3 Projeto Preliminar

No Projeto Conceitual projetou-se a máquina S2iAOI em modelos virtuais 3D através de um programa de Desenho Assistido por Computador - CAD, do inglês *Computer-Aided Design*.

Através do projeto em CAD foi possível obter as soluções para os diversos problemas mecânicos e a compatibilidade do *conveyor* da máquina com as outras máquinas existentes na linha de montagem SMT. A Figura 39 mostra o modelo CAD da máquina.

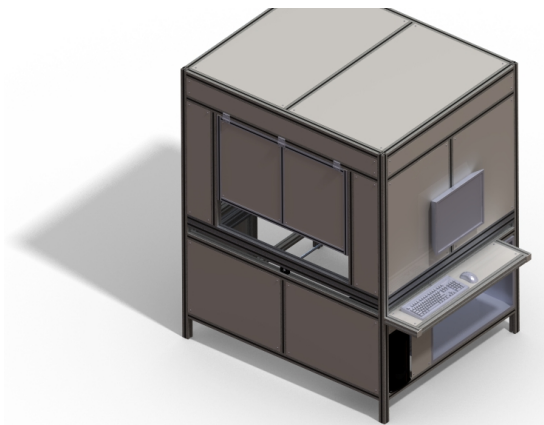


Figura 39 - Modelo CAD da máquina S2iAOI

3.2.4 Projeto Detalhado

Nesta etapa, realizou-se a montagem e testes da máquina de inspeção, assim como a realização dos desenhos técnicos para a usinagens das peças mecânicas.

O Projeto Conceitual e Detalhado serão descritos paralelamente na seção de Implementação da S2iAOI.

3.3 FERRAMENTAS DE APOIO

Nesta seção serão apresentadas as principais ferramentas e linguagens de programação utilizadas para o desenvolvimento da máquina.

3.3.1 Biblioteca de Visão Computacional

Visão Computacional (*Computer Vision*) é uma área que está crescendo rapidamente devido ao barateamento das câmeras, ao grande poder de processamento dos computadores atuais, e a recente maturação dos algoritmos de visão (BRADSKI; KAEHLER, 2008). A biblioteca *Open Source Computer Vision* - OpenCV tem contribuído muito para este crescimento. Foca-se no desenvolvimento de aplicações em tempo real, permitindo milhares de estudantes, pesquisadores e profissionais a desenvolverem com maior eficiência seus projetos nesta área.

A OpenCV é licenciada pela *BSD License*⁷, consequentemente a é gratuita para usos acadêmicos e comerciais. Possui interfaces com as linguagens de programação *C++*, *C*, *Python* e, recentemente, para *Java* (Android). Além disso, possuiu suporte para os sistemas operacionais *Windows*, *Linux* e *MacOS*. A biblioteca possui mais de 2500 algoritmos otimizados e é adotada por mais de 47 mil usuários da comunidade com mais de 5 milhões de downloads (estimativa) (OPENCVWIKI, 2012).

3.3.2 Linguagens de Programação

Utilizou-se a linguagem de programação Java para programar a interface gráfica através do programa *NetBeans*. A lógica de programação também foi feita em Java, mas foi necessário desenvolver alguns métodos em *C/C++* para realizar a aquisição de imagens através

⁷ Maiores informações sobre a *BSD License* podem ser encontradas em: <http://opensource.org/licenses/bsd-license.php>

das bibliotecas fornecidas pelo fabricante e para realizar o processamento das imagens através da biblioteca OpenCV.

Para fazer a integração entre as linguagens de programação Java e C/C++, utilizou-se a *Java Native Interface* – JNI. A *Java Native Interface* é uma ferramenta da plataforma Java que permite incorporar códigos nativos escritos em outras linguagens, como C e C++, nos códigos escritos na linguagem Java.

A JNI permite, além de usufruir das vantagens da plataforma Java, utilizar códigos escritos em outras linguagens. Assim como parte da implementação da Máquina Virtual, a JNI é uma interface de duas vias que permite que as aplicações desenvolvidas em Java invoque códigos nativos e vice-versa (LIANG,1999). A Figura 40 mostra a regra da JNI.

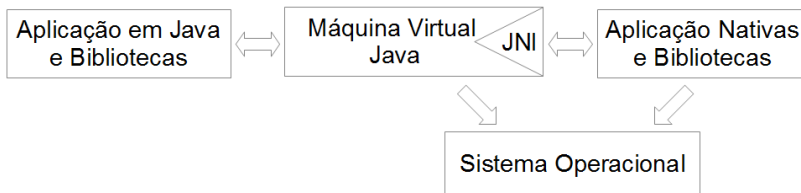


Figura 40 - Regra da Java Native Interface. Fonte: Adaptado (LIANG, 1999)

4 IMPLEMENTAÇÃO

A máquina S2iAOI possui três graus de liberdade na movimentação da câmera sobre a placa de circuito impresso no espaço cartesiano. Todas as juntas da máquina são prismáticas, conforme pode ser observado na Figura 41.

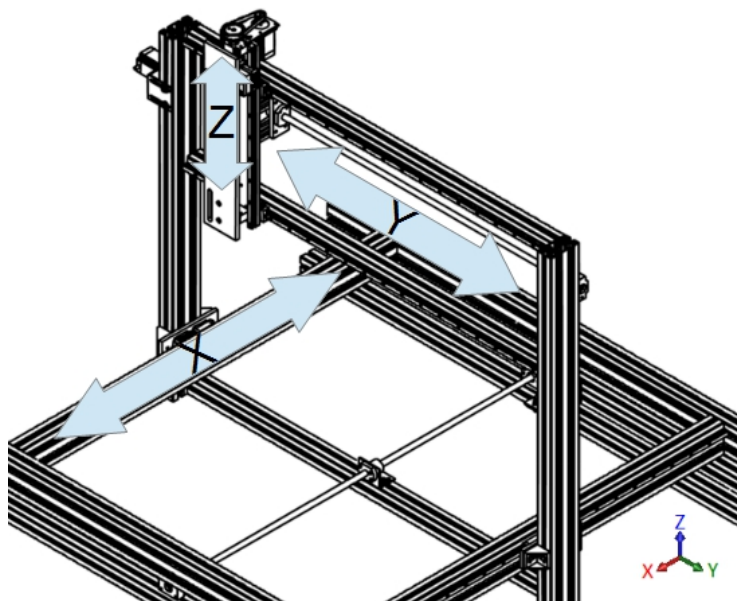


Figura 41 - Juntas Prismáticas da S2iAOI

Além das três juntas prismáticas já citadas, a S2iAOI possui um *conveyor* que é responsável por movimentar a PCI dentro da máquina e sua largura é ajustada automaticamente através de um eixo prismático que aumenta ou diminui a distância entre as esteiras transportadoras (Figura 42).

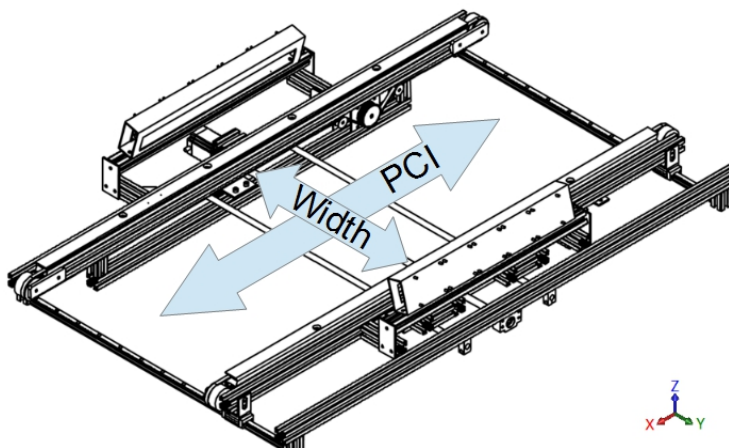


Figura 42 - Conveyor: Movimentação da PCI e ajusta da largura

4.1 DIAGRAMA GERAL DE FUNCIONAMENTO

A S2iAOI possui como principal central de processamento um computador convencional, no qual roda a interface gráfica (*Graphical User Interface* - GUI), a lógica de controle e os algoritmos de inspeção. O computador se comunica com o Painel de Controle através da interface RS-232. O Painel de Controle, por sua vez, é responsável por todo o funcionamento elétrico da máquina, tais como acionamento dos motores e leitura dos sensores.

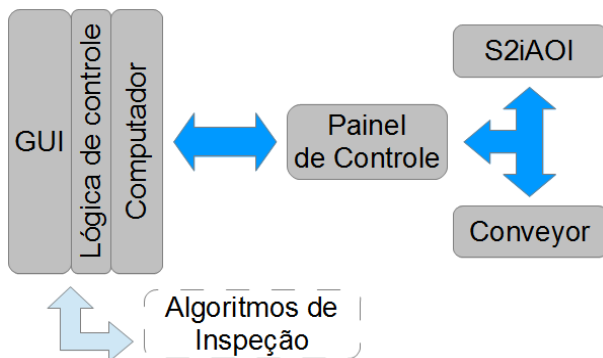


Figura 43 - Diagrama geral de funcionamento

4.2 CONCEPÇÃO MECÂNICA

Buscou-se, na concepção mecânica da S2iAOI, o máximo de flexibilidade possível, tanto na movimentação da câmera no espaço cartesiano quanto na flexibilidade do seu sistema de iluminação. Para isto, buscou-se componentes padronizados de fácil acesso no mercado brasileiro e fácil montagem e desmontagem desses elementos. São exemplos dessa abordagem o emprego de perfis extrudados de alumínio e componentes padronizados como: guias lineares, fusos de esferas, mancais, eixos e rolamentos lineares.

4.2.1 Eixos Prismáticos

Os eixos prismáticos da máquina têm como objetivo movimentar o sistema óptico nas direções X, Y e Z do espaço cartesiano, abrangendo uma área de inspeção de 371000 mm^2 ou 530mm no eixo X e 700mm no eixo Y.

O sistema de transmissão de cada eixo é constituído por fuso de esfera, polias sincronizadoras e motor de passo. O *driver*⁸ do motor de passo está configurado para controlá-lo com 400 passos por volta. O conjunto de polias sincronizadoras é responsável pela redução do sistema de transmissão, que fornece um maior torque e resolução do motor de passo, porém diminui a velocidade.

A polia motora possui 12 dentes e a polia movida possui 30 dentes. Para calcular a redução do sistema basta dividir o número de dentes da polia motora pelo número de dentes da polia movida, conforme ilustrado na Figura 44.

8 *Driver*: Dispositivo eletrônico responsável por controlar e fornecer energia para um motor. No caso deste projeto, utilizou-se drivers para controlar motores de passo através de pulsos de passo e direção.

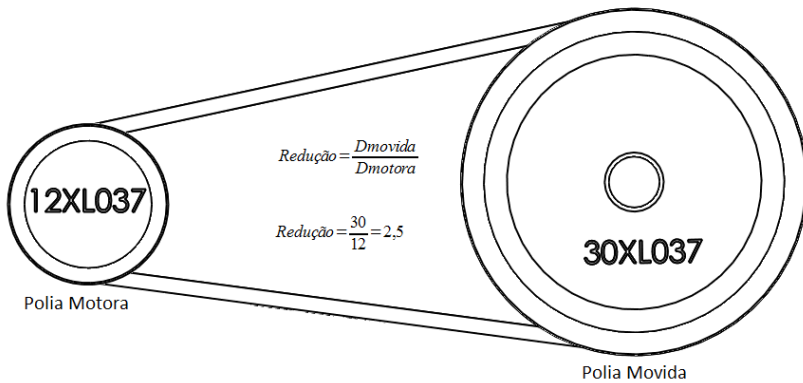


Figura 44 - Redução do conjunto de polias dos eixos prismáticos

Se multiplicarmos a redução pelo número de passos necessários para que o motor complete uma volta, teremos o número de passos necessários para que o fuso de esfera complete uma volta. Como o fuso de esfera possui passo de 5mm podemos definir a resolução para cada eixo prismático da S2iAOI com a Equação 6.

$$Resolução = \frac{\text{passoFuso}}{\text{redução} * \text{passosVolta}} = \frac{5}{2,5 * 400} = 0.005 \frac{\text{mm}}{\text{passo}} \quad (6)$$

Para fixar os motores nos perfis de alumínio, utilizou-se cantoneiras usinadas de acordo com a necessidade de cada eixo e, para fixar o fuso de esfera, utilizou-se mancais e rolamentos padronizados. A estrutura projetada do eixo X em CAD e a sua montagem podem ser vistas na Figura 45.

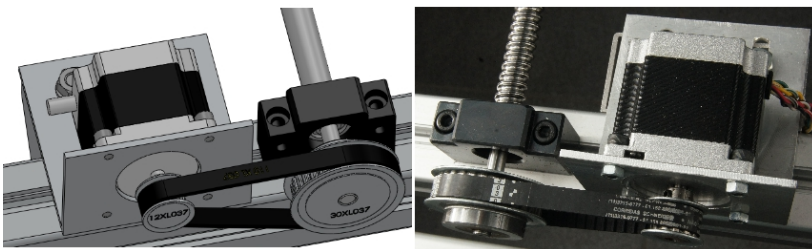


Figura 45 - Projeto CAD e montagem do eixo X

4.2.2 Conveyor

O *conveyor* transporta a placa no interior da máquina. Para isso ele conta com duas esteiras, sendo que cada uma delas é acionada por um motor de passo. A distância destas esteiras é definida pela largura da placa e pode ser variada automaticamente.

As esteiras são correias sincronizadoras (2), movimentadas por uma polia motora (1). Para deixar as correias esticada, projetou-se esticadores (3), fabricados em *nylon* que possuem a propriedade de autolubrificação, diminuindo o atrito durante a movimentação (Figura 46).

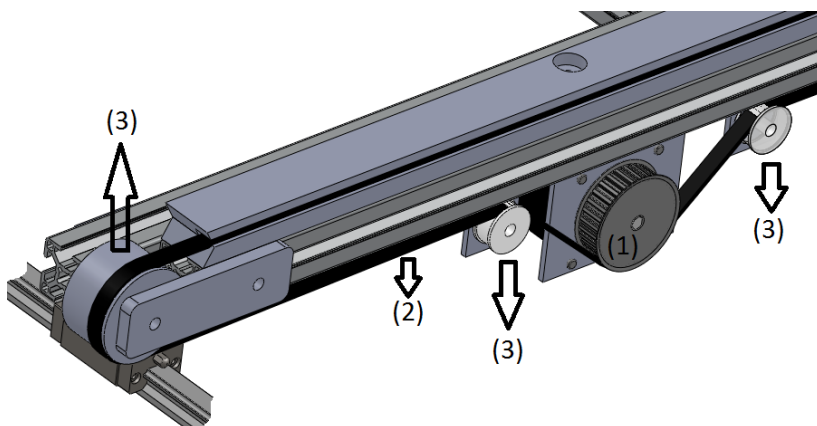


Figura 46 - Esteira do conveyor

No *conveyor* uma das esteiras é fixa e a outra se movimenta para se adaptar a largura da PCI a ser inspecionada. A esteira móvel é apoiada em guias lineares (1) nas suas extremidades e, mais ao centro, dois eixos lineares (2) ajudam a dar mais estabilidade durante a sua movimentação. Um fuso de esferas (3) acoplado diretamente a um motor de passo (4) movimentam a esteira, ajustando a largura do *conveyor* (Figura 47).

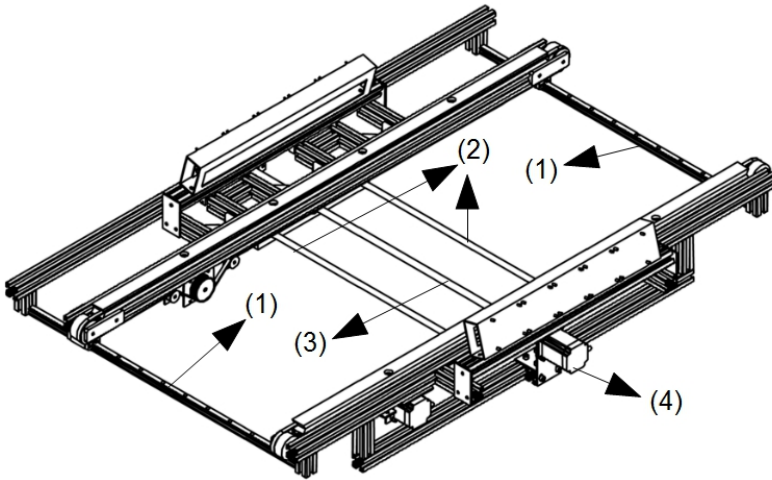


Figura 47 - Sistema de ajuste da largura do Conveyor

O *driver* do motor de passo do *conveyor* também está configurado para, a cada 400 passos, o motor de passo completar uma volta (Figura 48). Como passo do fuso é de 5mm, basta dividir esta resolução por 400 para obtermos a resolução de 0.0125mm por passo do ajuste da largura do *conveyor*.

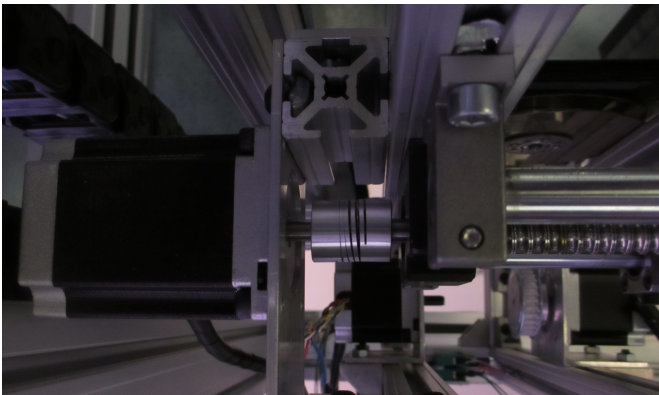


Figura 48 - Acoplamento do motor de passo com o fuso de esfera

4.2.3 Suporte da câmera e da iluminação central

O suporte da câmera e da iluminação central, fixado no eixo Z, foi desenvolvido de modo que seja possível ajustar a câmera, deixando-a perpendicular ao plano que se encontra a placa de circuito impresso. A Figura 49 mostra o projeto CAD e a montagem final das peças que formam o suporte.

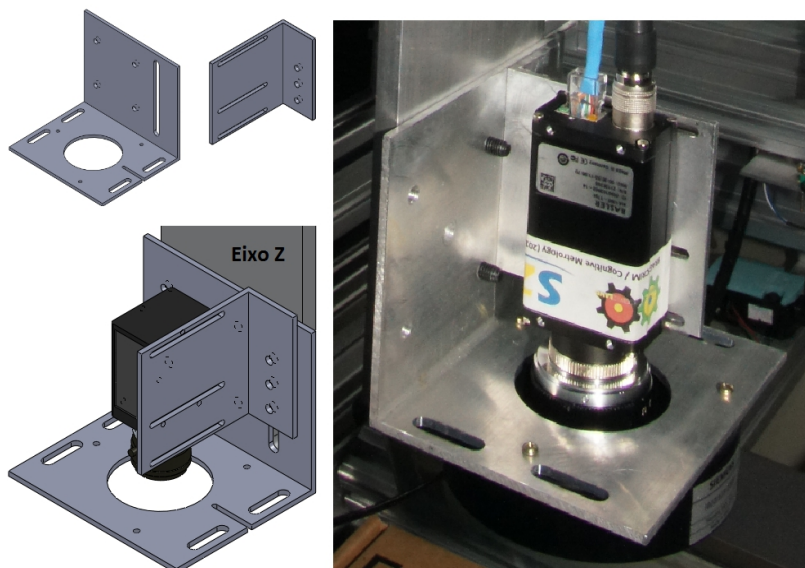


Figura 49 - Suporte da Câmera

4.3 CONCEPÇÃO ELETROELETRÔNICA

4.3.1 Diagrama de Blocos

O diagrama de blocos (Figura 50) representa os principais elementos eletroeletrônicos da S2iAOI e a relação entre os elementos de envio ou recebimento de sinais, comunicação RS-232 e sinais de potência (alimentação). A partir deste diagrama, é possível ter uma visão geral da estrutura eletroeletrônica da máquina.

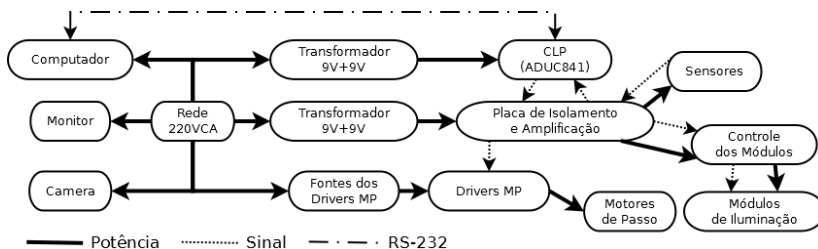


Figura 50 - Diagrama de Blocos

A rede elétrica de 220VCA alimenta o computador, o monitor, a câmera, os transformadores e, por fim, as fontes dos drives dos motores de passo. O transformador da placa de controle fornece-lhe energia, permitindo-o comunicar-se com o computador através da interface RS-232, enviar e receber sinais da Placa de Isolamento, que possui outro transformador para a sua alimentação. A Placa de Isolamento tem a função de isolar os sinais de entrada e saída, protegendo o controlador, os *drivers*, os sensores e os módulos de sobrecargas ou sobrecorrentes.

O Controle do Módulos possui um microcontrolador AT89S8253 que recebe o sinal da Placa de Isolamento, trata estes sinais e aciona os módulos de acordo com o sinal recebido. A alimentação dos módulos pode vir da Placa de Isolamento ou de outra fonte, caso necessário. Os sensores indicam o estado da máquina, tais como Sensores de *Home*⁹ acionados/não acionados ou presença/ausência de alguma PCI na máquina.

As fontes dos drives dos motores de passo fornecem a alimentação necessária para que eles possam funcionar, recebendo sinais das Placa de Isolamento (*step* e *dir*), fornecendo a energia necessária e o controle para que os motores de passo possam ser acionados.

4.3.2 Circuito de Intertravamento

Para que não haja danos físicos à máquina se alguns dos eixos atingirem o final de seu curso ou caso haja necessidade do operador interromper a movimentação deles, desligando o circuito de potência, foi desenvolvido um circuito de intertravamento. O circuito mostrado na Figura 51 representa o esquema elétrico do intertravamento. Se os sensores Fim de Curso - FC e a Parada de Emergência - PE não

9 **Sensor de Home:** Sensor de contato utilizado para identificar quando o eixo está na sua posição zero

estiverem acionados, basta o operador acionar o botão ON para ligar o circuito, fazendo com que a corrente circule pela contadora (K). Quanto à contadora, seu contato é normalmente fechado - NA, permitindo que ela mesma mantenha o circuito acionado. Desta maneira, o operador pode saltar o botão ON que o circuito não desligará. A corrente do circuito será cortada se a Parada de Emergência, o botão OFF ou alguns dos sensores Fim de Curso forem acionados, desligando o circuito de potência imediatamente.

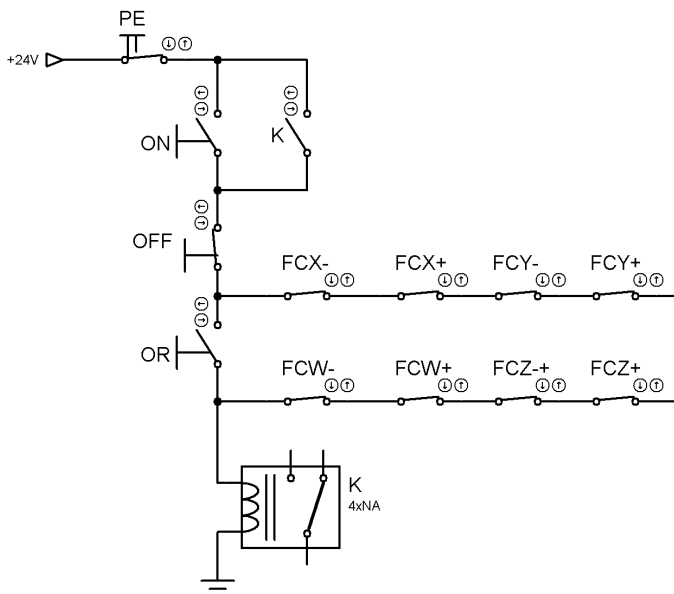


Figura 51 - Circuito de Intertravamento

O botão OR permite que o operador ligue a máquina mesmo quando um dos sensores de Fim de Curso estiverem acionados. Com isto, é possível movimentar o eixo que o acionou e liberá-lo, movimentado o eixo. Após o desacionamento do sensor, o operador pode soltar o botão OR.

4.3.3 Circuito de Potência

O Circuito de Potência é responsável por toda a alimentação da máquina e pode ser dividido em dois curto-circuitos: Baixa Potência e

Alta Potência. O circuito de Baixa Potência alimenta as placas do controlador e do Isolamento de Sinais e o *cooler* para a ventilação do painel. Este circuito é acionado quando a chave geral é ligada. Para acionar o circuito de Alta Potência, além da chave geral é necessário que o circuito de intertravamento seja acionado, conforme explicado anteriormente. O circuito de Alta Potência alimenta as fontes dos *drives* X, Y, Z, C1 e C2 que, por sua vez, alimentam os *drives* e, conseqüentemente, os motores de passo (Figura 52).

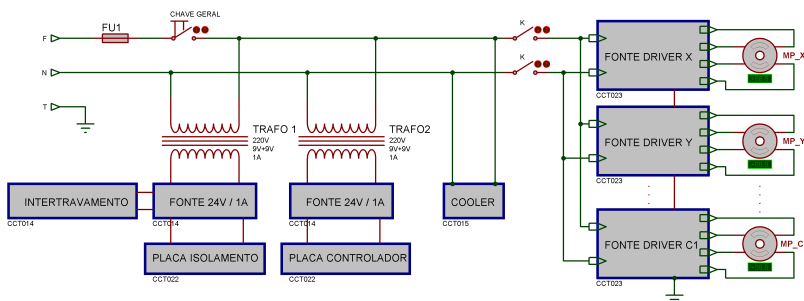


Figura 52 - Circuito de Potência

4.3.4 Placa de Isolamento e Amplificação de Sinais

A placa de isolamento e amplificação de sinais foi desenvolvida para amplificar e isolar os sinais que chegam ou saem do controlador, evitando possíveis danos de sobrecargas nele. Apenas os sinais dos *drives* dos motores de passo não são isolados, pois eles já possuem isolamento próprio. A Figura 53 mostra o circuito de amplificação destes sinais, lembrando que, para cada *driver*, é necessário um sinal de step e outro de dir.

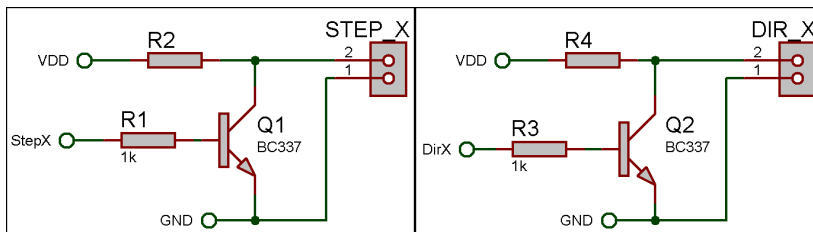


Figura 53 - Circuito de amplificação dos sinais para os drivers

Os quatro sinais que saem do controlador e vão para a placa responsável pelo acionamento dos módulos são isolados e amplificados conforme mostra a Figura 54. O isolamento é realizado por meio de um opto acoplador 4N25.

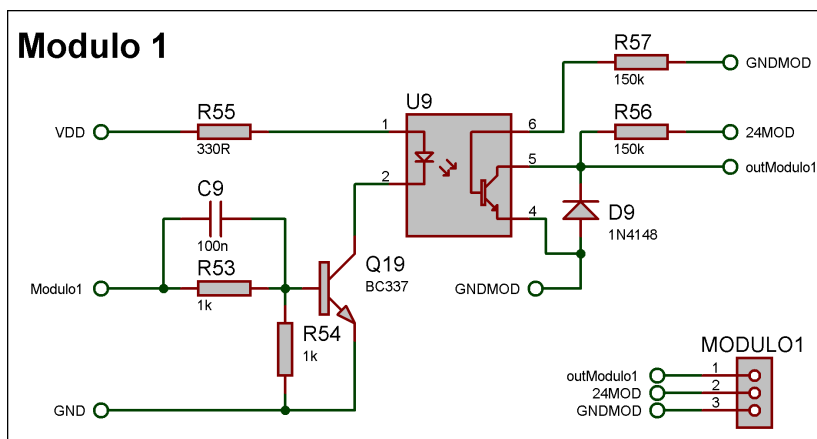


Figura 54 - Circuito de isolamento e amplificação dos sinais dos módulos

O sinal que sai dos sensores *Homes* de cada eixo da máquina é isolado da mesma forma que os sinais dos sensores são isolados, conforme é mostrado na Figura 55.

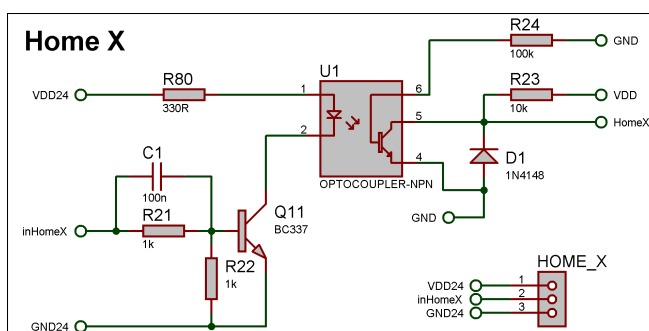


Figura 55 - Circuito de isolamento e amplificação dos sinais dos *homes*

Para alimentar os sensores e os módulos de iluminação, a placa de isolamento e amplificação de sinais possui uma fonte de alimentação

(Figura 56). A fonte retifica a tensão alternada do transformador 9V+9V, convertendo-a em tensão contínua de aproximadamente 24V. Outra tensão contínua que a fonte oferece para alimentação da placa de controle dos módulos é de 5V através do regulador de tensão 7805.

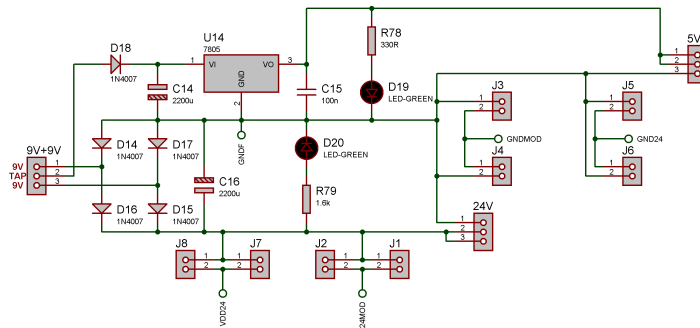


Figura 56 - Fonte de alimentação

4.3.4.1 Layout da Placa de Isolamento

A partir do esquema elétrico da placa de isolamento, desenvolveu-se o seu *layout* através do *software* ARES do Proteus. A placa foi desenvolvida em face simples, onde as trilhas em roxo, mostradas na Figura 57, são as trilhas da placa e as trilhas em vermelho, *jumpers*.

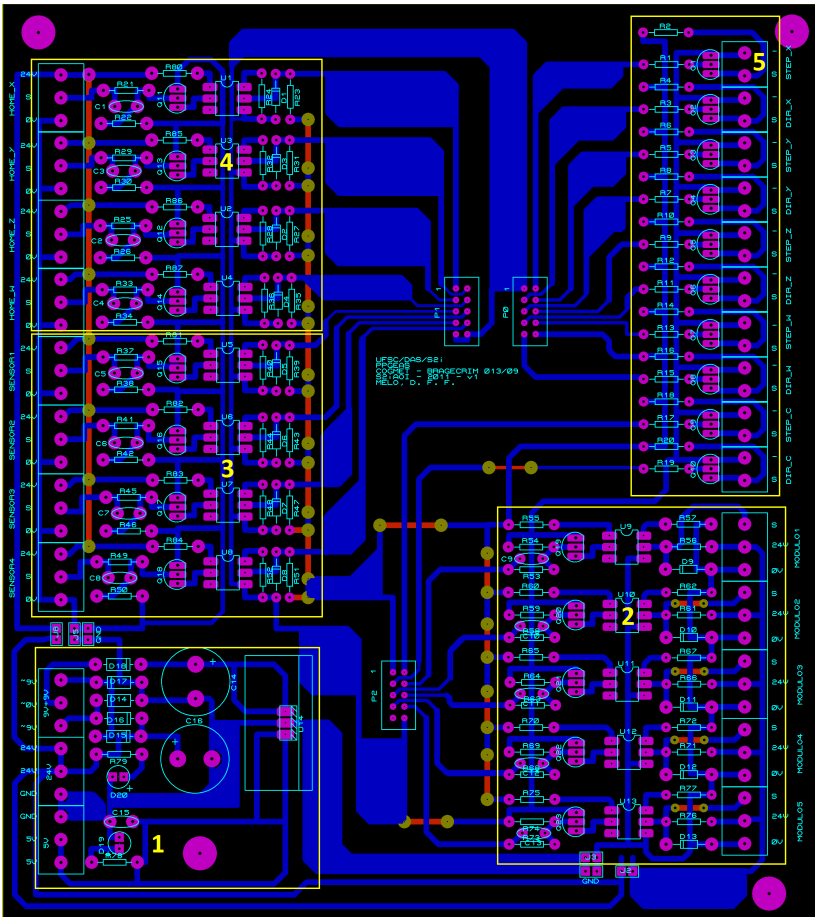


Figura 57 - *Layout* da placa de isolamento e amplificação de sinais

Através da Figura 57 podemos observar a localização dos circuito forma a placa de isolamento:

1. Fonte de Alimentação;
2. Módulos de Iluminação;
3. Sensores (presença);
4. *Homes*;
5. *Drivers*.

4.3.5 Placa de Controle da S2iAOI

4.3.5.1 *Firmware*

O *firmware* da placa de controle foi desenvolvido na linguagem C. Atualmente seu principal objetivo é realizar a movimentação dos eixos X, Y e Z, ajuste da largura do *conveyor* e leitura dos sensores de presença/ausência de PCI. Para isto, o *firmware* conta com uma série de funções que são citadas e descritas a seguir:

- **S2iConfigCLP:** Configura o microcontrolador ADUC841 e inicializa a interface RS-232;
- **S2iMoveAxisXYEquals:** Esta função aciona os motores de passo dos eixos X e Y simultaneamente quando o número de passos deles são iguais.
- **S2iMoveAxisXY:** Esta função aciona os motores de passo dos eixos X e Y simultaneamente quando o número de passos deles são diferentes. Nesta função é verificado qual dos motores terá um maior avanço e qual é a razão de avanço de um motor para o outro. Desta forma, é possível fazer a compensação na geração dos passos dos motores, movendo-os simultaneamente e parando-os juntos.
- **S2iMoveAxis[X,Y,Z]:** Essas três funções geram os passos dos motores X, Y e Z individualmente, movimentando apenas um eixo da máquina.
- **S2iConveyorControl:** Aciona as esteiras do *conveyor* para posicionar a PCI no interior da máquina. Esta função recebe como parâmetro qual sensor deve ser acionado para desligar as esteiras ou se ela será desligada quando receber uma nova mensagem pela serial.
- **S2iMoveW:** Esta função gera os passos do motor do *conveyor* responsável pelo ajuste da largura da PCI.
- **S2iHomeXYZ:** Realiza o *home* dos eixos X, Y e Z.
- **S2iHomeW:** Realiza o *home* da largura do *conveyor*.
- **S2iTurnON[X,Y,Z,W]:** Liga o motor de passo correspondente (X,Y,Z ou W) e conta o número de passos gerados até o recebimento de uma mensagem (via serial) para parar o motor. Em seguida, o número

de passos é enviado pela serial para que o computador possa calcular a distância percorrida pelo eixo correspondente.

- **S2iTurnOnModules:** Recebe como parâmetro o código do(s) módulo(s) que deve(m) ser acionado(s) ou desligado(s) e combina os *bits* de saída dos módulos que serão interpretados pela placa de controle dos módulos.
- **Main():** Função principal do programa. Esta função basicamente recebe os códigos pela serial, enviados pelo computador, e realiza as chamadas das funções acima. Esta troca de mensagem obedece um protocolo desenvolvido para esta aplicação. O protocolo pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Protocolo de comunicação entre o microcontrolador e o computador via interface serial RS-232


















Código	Origem/Destino	Descrição
i 00 e	uC → PC	Controlador livre para nova mensagem/ Função executada com sucesso
i 01 xxxxxx d yyyyy d e	PC → uC	Avança eixos X e Y xxxxxx e yyyyyy passos respectivamente (d → direção).
i 02 zzzzzz d e	PC → uC	Avança eixo Z zzzzzz passos (d → direção)
i 04 e	PC → uC	Estabelece comunicação com o PC
i 05 e	uC → PC	Comunicação estabelecida
i 06 e	uC → PC	Comunicação não estabelecida
i 07 e	PC → uC	Reseta o microcontrolador. Aguarda novamente a Comunicação com o PC (Código i 04 e).
i 08 xxxxxx d e	PC → uC	Avança eixo X xxxxxx passos (d → direção).
i 09 yyyyyy d e	PC → uC	Avança eixo Y yyyyyy passos (d → direção).
i 10 S e	PC → uC	Liga/Desliga o RingLight (S → L = Liga ou D = Desliga)

i 11 mm e	PC → uC	Liga Módulos (mm → Código dos Módulos)*
i 12 e	PC → uC	Desliga todos Módulos
i 19 e	PC → uC	Home W
i 20 e	PC → uC	Home XYZ
i 21 wwwwww d e	PC → uC	Avança W wwwwww passos (d → direção).
i 22 m d e	PC → uC	Aciona o <i>Conveyor</i> (m → Modo)** (d → Direção)
i 23 d e	PC → uC	Liga motor X (d → direção)
i 24 d e	PC → uC	Liga motor Y (d → direção)
i 25 d e	PC → uC	Liga motor Z (d → direção)
i 26 d e	PC → uC	Liga motor W (d → direção)
i 99 e	uC → PC	Falha ao executar a tarefa ou Código enviado inválido

*A Tabela 3 mostra quais são os modos possíveis e quais módulos de iluminação serão acionados.

Tabela 3 – Códigos para o acionamento dos módulos de iluminação

mm	Descrição				
00	Desliga todos os módulos (1 2 3 4 5)				
01	■	□	□	□	□
02	□	■	□	□	□
03	□	□	■	□	□
04	□	□	□	■	□
05	□	□	□	□	■
06	■	■	□	□	□
07	□	■	■	□	□
08	□	□	■	■	□
09	□	□	□	■	■

10					
11					
12					
13	Liga o módulo central (Ring Light ou Domo)				
	 ON	 OFF			

**A Tabela 4 mostra os códigos que são enviados para o acionamento das esteiras do *conveyor*. Cada código corresponde a um sensor do qual a esteira será desligada quando ele for acionado, ou ainda, se ela será desligada através de uma mensagem enviada via serial.

Tabela 4 – Códigos para o acionamento das esteiras do *conveyor*

m	Descrição
1	Até identificação do Sensor 1
2	Até identificação do Sensor 2
3	Até identificação do Sensor 3
4	Até identificação do Sensor 4
5	Até nova mensagem

4.3.6 Placa de controle dos módulos de iluminação

A placa de controle dos módulos de iluminação é responsável por codificar os sinais enviados pelo controlador e acionar os módulos correspondentes aos sinais codificados. O controlador da placa é um microcontrolador AT89S8253 da Atmel, escolhido pela afinidade do autor em razão ao curto tempo para o desenvolvimento do projeto. A Figura 58 mostra o esquema elétrico da entrada dos sinais da placa. Quando sinal M1, gerado pelo CLP, é 0V a tensão VCC é aplicada no pino do microcontrolador (A), já quando o sinal sobe para 24V a tensão aplicada em A será 0V. Este circuito se repete quatro vezes, um para cada sinal. Desta forma, o microcontrolador pode receber até 16 códigos diferentes para codificá-los e acionar os módulos.

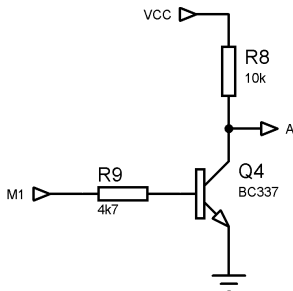


Figura 58 - Entrada dos sinais na placa de controle dos módulos

A Figura 59 mostra o esquema elétrico da saída da placa de controle. O microcontrolador pode chavear o transistor Q5, acionando ou desacionando o módulo M1. Atualmente a S2iAOI possui cinco módulos *Dark Field* e um módulo que poder *Ring Light* ou *Domo*. Portanto, esta saída do microcontrolador se repete mais cinco vezes.

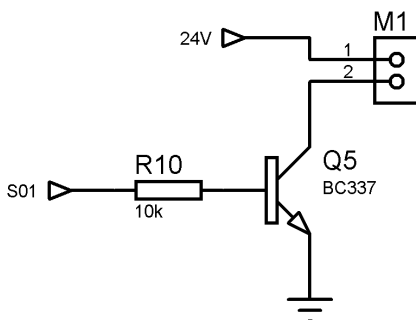


Figura 59 - Saída da placa de controle dos módulos

Através do esquema elétrico da placa, desenvolveu-se o *layout* e, em seguida, fabricou-se a placa de circuito impresso. O *layout* da placa pode ser visto na Figura 60.

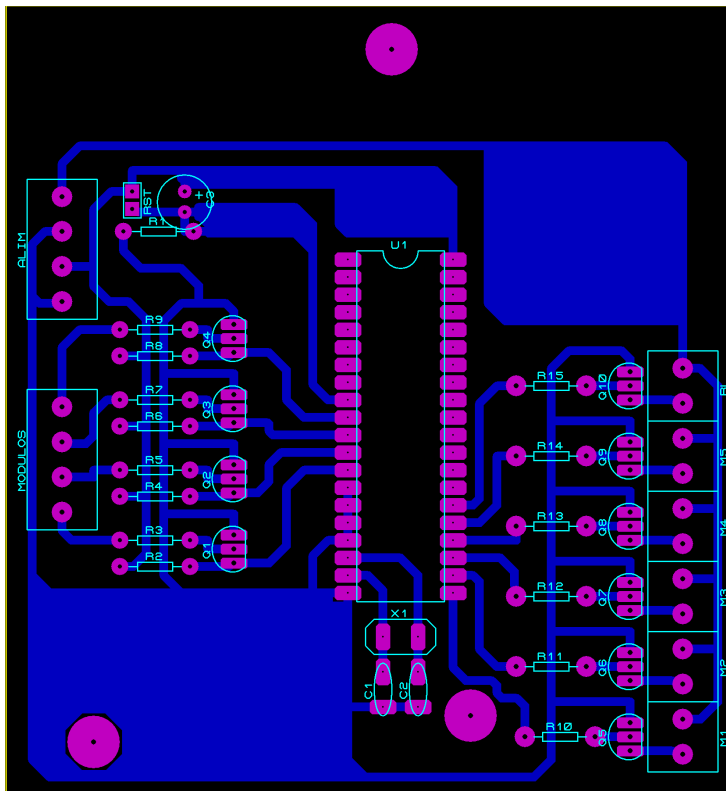


Figura 60 - Layout da placa de controle dos módulos

4.3.6.1 Firmware

A programação do microcontrolador AT89S8253 foi feita na linguagem C e comunica-se com o microcontrolador ADUC841 da placa de controle principal através de quatro bits. Esses bits são codificados e, para cada combinação, um ou mais módulos são acionados. A Tabela 5 mostra os bits de entrada do microcontrolador e a ação gerada por ele.

Tabela 5 – Códigos binários para o acionamento dos módulos de iluminação

Bits				Módulos de Iluminação					
B3	B2	B1	B0	M5	M4	M3	M2	M1	RL
0	0	0	0	ON	ON	ON	ON	ON	OFF
0	0	0	1	ON	ON	ON	ON	ON	ON
0	0	1	0	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
0	0	1	1	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
0	1	0	0	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
0	1	0	1	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
0	1	1	0	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
0	1	1	1	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
1	0	0	0	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
1	0	0	1	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
1	0	1	0	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
1	0	1	1	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
1	1	0	0	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
1	1	0	1	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
1	1	1	0	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF
1	1	1	1	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

O microcontrolador realiza um *polling* contínuo, lendo os seus quatro bits de entrada. Inicialmente os bits estão todos em 1, ou seja, todos os módulos ficam desligados. Quando alguma entrada muda de estado, o microcontrolador codifica as entradas e aciona os módulos correspondentes ao código. É possível expandir para 5 o número de bits da entrada e, desta forma, o número de combinações passa de 16 para 32, aumentando a flexibilidade dos módulos de iluminação.

4.3.7 Módulo de Iluminação

Cada módulo de iluminação foi desenvolvido utilizando LEDs de alto-brilho de 5mm de diâmetro, dispostos numa matriz 5x10. Os LEDs foram dispostos em linhas que formam um zigue-zague para melhor

distribuição da luz, conforme pode ser observado na Figura 61. Utilizou-se LEDs, pois não apresentam problemas de aquecimento, reagem de maneira instantânea (sem inércia no acionamento) e são alimentados com baixa tensão e baixa corrente, além de apresentarem alta capacidade de iluminação.

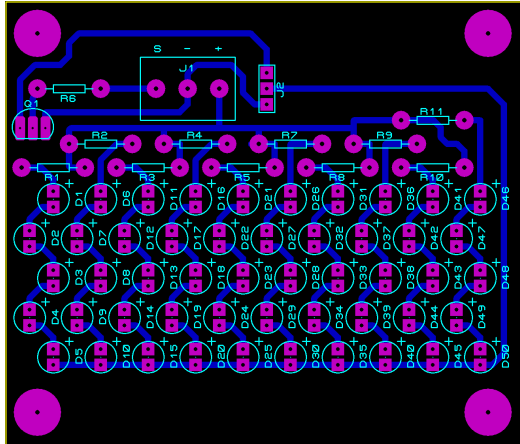


Figura 61 - Layout do módulo de iluminação

O módulo pode ser acionado de duas formas: através de um sinal na base de um transistor BC337 ou através de alimentação direta. A seleção é feita através de um *jumper*, conforme mostra a Figura 62. Quando o *jumper* está na posição (1) os LEDs são acionados quando o transistor BC337 é chaveado e, quando está na posição 2, os LEDs são acionados com alimentação direta, ou seja, tendo um circuito fechado com 24V e GND.

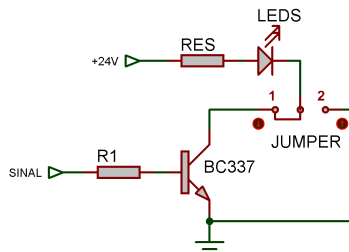


Figura 62 - Esquema de ligação do módulo de iluminação

Atualmente a máquina conta com dois módulos de iluminação lateral. Cada módulo possui cinco matrizes de LEDs apresentadas anteriormente, sendo que cada matriz pode ser acionada individualmente através da placa de controle dos módulos de iluminação.

A Figura 63 mostra o esquema de ligação das matrizes em cada módulo de iluminação lateral. Todas as matrizes são acionadas de forma direta, ou seja, utilizando a configuração com o *jumper* na posição 2.

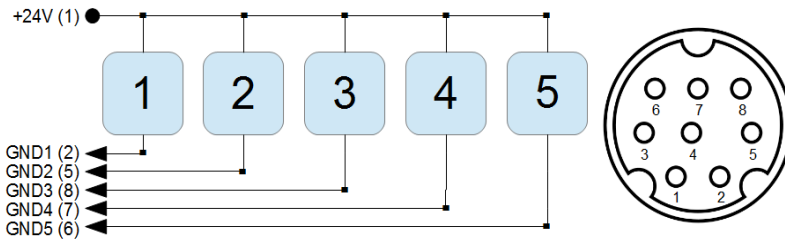


Figura 63 - Esquema de ligação entre os módulos

As matrizes de LEDs (1) foram posicionadas lado a lado dentro de um perfil de alumínio (2) e, colocou-se um vidro jateado (3) para dispersar a luz, evitando que os feixes de luz se concentrem em algum local específico. Esta montagem pode ser vista na Figura 64.

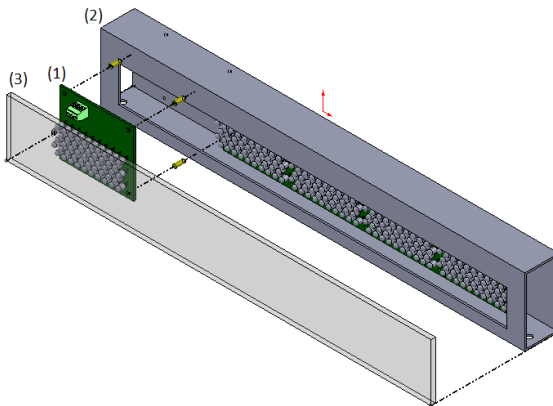


Figura 64 - Montagem do módulo de iluminação lateral

4.3.8 Painel Eletroeletrônico

O painel elétrico da máquina foi desenvolvido para reunir os drives, suas respectivas fontes, a placa de controle e de isolamento. Ele foi dividido em três grandes blocos: (1) Bornes, (2) Baixa Potência e (3) Alta Potência. Os bornes são as entradas/saídas dos cabos que distribuem os sinais pela máquina. O bloco de baixa potência reúne a placa de controle e de isolamento, onde circulam apenas sinais de baixa potência. Os drives e suas fontes formam o bloco de alta potência. A distribuição dos blocos no painel podem ser vistos na Figura 65.

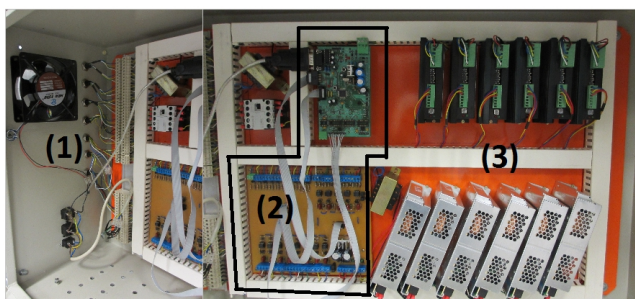


Figura 65 - Painel Elétrico da S2iAOI

4.4 SOFTWARE

O *software* da S2iAOI foi desenvolvido com o intuito de facilitar a inserção de novos algoritmos de inspeção (processamento de imagens), sem que haja uma grande modificação da estrutura do algoritmo base. O algoritmo base da máquina pode ser dividido em seis módulos: Controle dos Eixos, Controle da Iluminação, Dados em *eXtensible Markup Language* - XML, Aquisição de Imagens, Configuração e Interface Gráfica Principal. O módulo de Controle dos Eixos e da Iluminação são responsáveis pela movimentação da câmera pelos eixos cartesianos, acionamento e ajuste da largura do *conveyor* e acionamento dos módulos de iluminação.

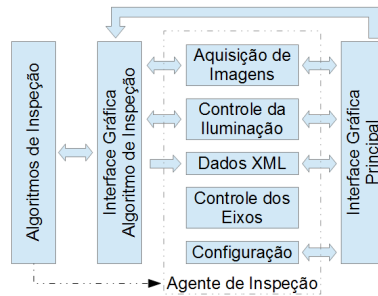


Figura 66 - Diagrama dos módulos do software da S2iAOI

Já o módulo de Aquisição de Imagens é responsável por adquirir e salvar imagens da placa em um diretório pré-determinado. Todos os dados e parâmetros ajustados, tanto na aquisição das imagens, quanto nos controles das S2iAOI são armazenados em arquivos XML, dos quais poderão ser enviados e recebidos por agentes. Estes arquivos contêm as informações necessárias para que a máquina realize as inspeções das PCIs. O módulo de Configuração é responsável pela calibração dos eixos X e Y e, também, por encontrar o ponto zero da placa através das marcas fiduciais.

Por fim, o módulo da Interface Gráfica Principal - GUIP oferece ao operador uma interface amigável para movimentar e configurar a câmera, acionar o sistema de iluminação, selecionar os defeitos que devem ser inspecionados numa determinada área e rodar o programa de inspeção. Ao selecionar algum defeito, esta interface gráfica chamará outra GUI, específica deste defeito, na qual os parâmetros dele serão ajustados e salvos no arquivo XML da inspeção. Cada um destes módulos serão detalhados posteriormente.

4.4.1 Interface Gráfica Principal

Nesta seção, será apresentada em detalhes a Interface Gráfica Principal desenvolvida e implementada. A Figura 67 mostra uma visão geral da GUIP e as regiões numeradas serão detalhadas a seguir com suas principais funcionalidades. A GUIP foi desenvolvida na linguagem Java através da *Integrated Development Environment - IDE NetBeans*, pois esta IDE possui ferramentas que facilitam e tornam o projeto da interface gráfica mais intuitiva.

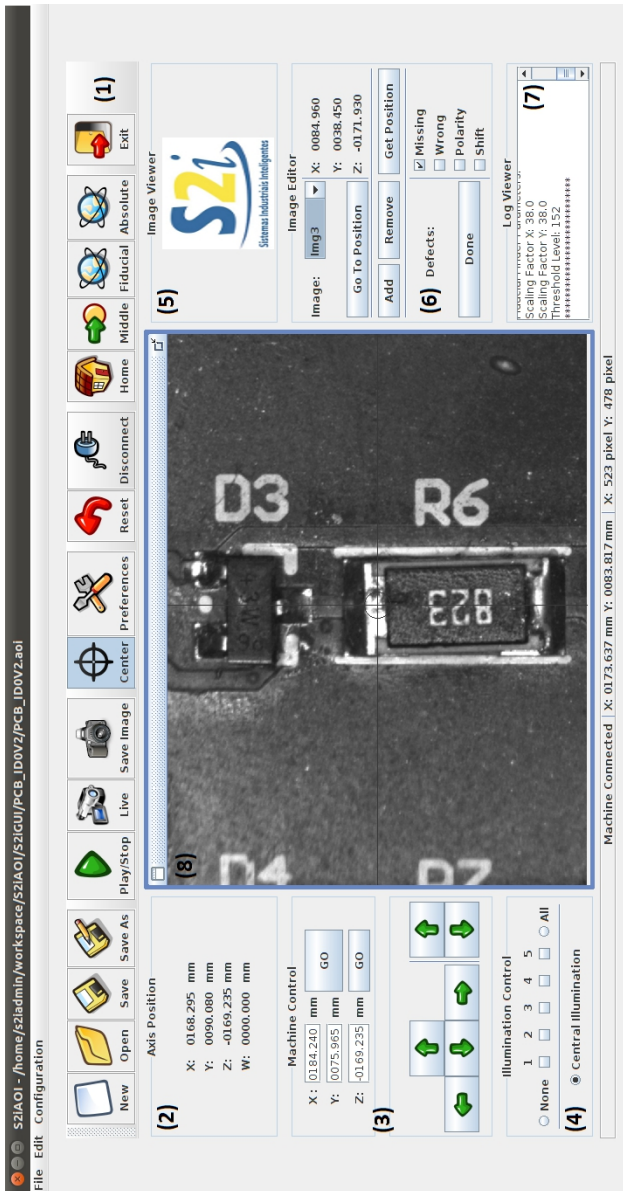


Figura 67 - Interface Gráfica Principal

- 1) **Barra de Ferramentas:** Através desta barra de ferramentas é possível acessar as principais funções da GUIP tais como, criar, salvar e abrir programas de inspeção, habilitar/desabilitar a visão, em tempo real, da câmera (Figura 68).



Figura 68 - Barra de Ferramentas - GUIP

- **New:** ao clicar no botão *New* uma nova janela é aberta contendo as informações iniciais básicas sobre a placa: Identificação – ID, versão do programa, largura da placa e número de fiduciais, que devem ser preenchidas pelo operador;
- **Open:** abre um programa de inspeção já existente;
- **Save & Save As:** salvam o programa que está sendo desenvolvido;
- **Play/Stop:** roda o programa de inspeção;
- **Live:** habilita/desabilita a visão da placa em tempo real;
- **Save Image:** adquire a imagem que está sendo mostrada na tela;
- **Center:** ao habilitar este botão, aparece a imagem em tempo real
- **Preferences:** botão reservado para realizar as configurações básicas da S2iAOI, tais como, serial, resolução dos eixos, etc. Entretanto, as funções deste botão não foram desenvolvidas até o momento.
- **Connect:** Quando o botão *Connect* é pressionado, uma mensagem é enviada para o microcontrolador, verificando se ele está ou não em estado de espera para estabelecer a comunicação entre ele e o computador. Caso positivo, a conexão entre eles é estabelecida e o botão *Connect* passa a receber o nome de *Disconnect* que, ao ser pressionado, uma nova mensagem é enviada ao microcontrolador para cancelar a comunicação entre os dois;
- **Reset:** força o retorno do microcontrolador para o estado de espera (aguardando uma nova conexão);
- **Home:** abre uma janela que permite ao usuário escolher se ele quer realizar o zeramento dos eixos X, Y e Z ou do *conveyor*;

- **Middle:** realiza a aproximação da câmera no centro da placa (eixo Y) da placa quando o eixos estão na posição zero, em relação à máquina, de forma segura, levando sua largura em consideração;
- **Fiducial:** abre uma janela para configurar o algoritmo para encontrar as fiduciais e a posição do zero da placa. Este algoritmo será detalhado nas próximas seções.
- **Absolute:** alterna a visualização da posição da máquina entre absoluta (posição em relação ao zero da máquina) ou relativa (posição em relação ao zero da placa).

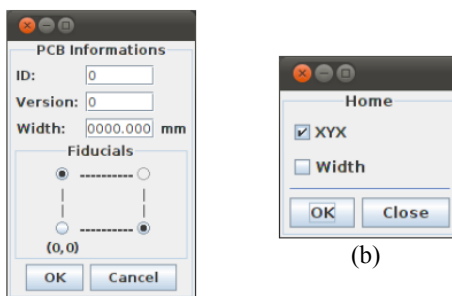


Figura 69 - (a) Botão *New* (b) Botão *Home*

- 2) **Axis Position:** Mostra a posição atual dos eixos X, Y e Z da máquina e a largura do *conveyor* (W). Esta posição pode variar entre absoluta ou relativa, dependendo do estado do botão *Absolute*.

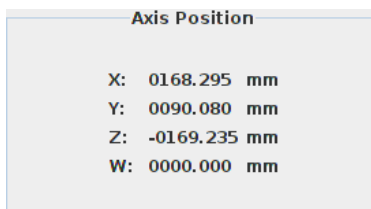


Figura 70 - Axis Position - GUIP

- 3) **Machine Control:** Através deste painel, é possível movimentar os eixos da máquina digitando a posição desejada. Os eixos X e

Y movimentam-se simultaneamente, portanto existe apenas um botão **GO** e o eixo Z movimenta-se sozinho, havendo um botão **GO** exclusivo para este eixo, conforme pode ser observado na Figura 71. A movimentação também pode ocorrer através dos botões com as setas. A movimentação tem início quando o operador pressiona e o mantém pressionado, e termina quando ele solta o botão. O microcontrolador conta o número de passos realizados durante este período e retorna este valor para o computador que, baseado na posição de início, calcula a posição final do eixo.

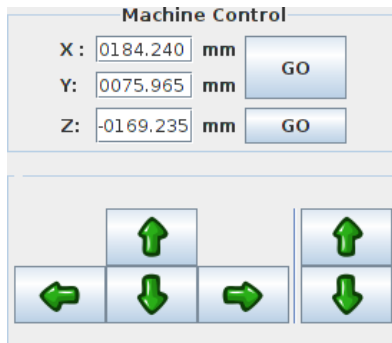


Figura 71 - *Machine Control* - GUIP

- 4) ***Illumination Control***: Painel responsável pelo acionamento dos módulos de iluminação da S2iAOI. Com este módulo é possível escolher o acionamento de até três módulos laterais consecutivos ou todos os cinco. Também é possível ligar/desligar a iluminação central, atualmente, o *Ring Light*.

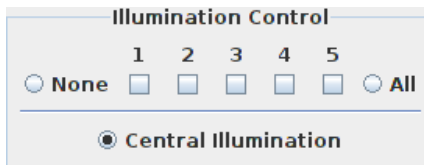


Figura 72 - *Illumination Control* - GUIP

- 5) ***Image Viewer***: Este painel tem o objetivo de mostrar a imagem que foi selecionada em ***Image Editor***. Entretanto, esta

funcionalidade não foi implementada e mostra apenas o logotipo do grupo de pesquisa S2i.

- 6) **Image Editor:** Neste painel é realizada a programação da inspeção. O usuário, depois de posicionar a câmera no local a ser inspecionado, clica no botão **Add** (1) para adicionar uma nova imagem de referência ao programa e seleciona qual defeito será inspecionado (2). Ao selecionar o defeito, uma nova interface gráfica é aberta (específica para o defeito selecionado), onde o operador seta os parâmetros da inspeção. Ao fechar esta interface gráfica, os parâmetros ficam salvos temporariamente numa variável e só serão salvos no arquivo XML quando o botão **Save** (Barra de Ferramentas) for clicado. Vários defeitos podem ser selecionados para a mesma posição, clicando em outro defeito.

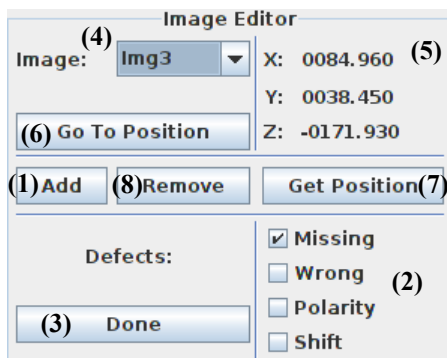


Figura 73 - Image Editor - GUIP

Após a seleção dos defeitos, clica-se no botão **Done** (3) que adquire uma imagem para cada defeito com os parâmetros configurados. É possível trocar e visualizar o posicionamento das imagens já editadas, clicando na lista **Image** (4). A posição da imagem selecionada na lista é mostrada em (5), porém esta posição não necessariamente é a posição atual da câmera. Entretanto, é possível movimentar automaticamente a câmera para a posição da imagem clicando em **Go To Position** (6).

Também é possível trocar a posição da imagem selecionada na lista pela posição atual da câmera, clicando em **Get Position** (7) com a vantagem de não precisar remover toda a programação feita na imagem da lista, porém, como a imagem será outra, é necessário finalizar

novamente o processo clicando em **Done**. Para remover uma imagem da lista e apagar a programação feita para ela basta clicar no botão **Remove** (8).

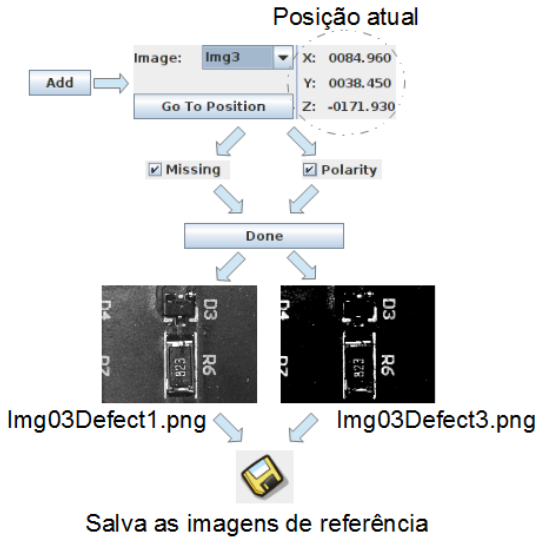


Figura 74 - Fluxograma da programação de um defeito na S2iAOI

7) **Log Viewer:** No painel *Log Viewer* é possível verificar as principais ações e resultados da S2iAOI na forma de *log*. Na Figura 75 nota-se o resultado de uma calibração apresentado neste painel.

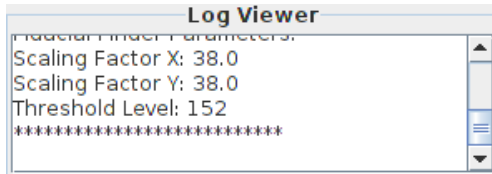


Figura 75 - *Log Viewer* - GUIP

- 8) **Camera Viewer:** A imagem em tempo real que a câmera está adquirindo é mostrada neste painel. Caso a calibração já tenha sido feita, também é possível movimentar a câmera. Clicando em um ponto da imagem, a câmera irá se movimentado de modo que o centro do painel (cruzamento das linhas) coincida com o ponto clicado (Figura 76).

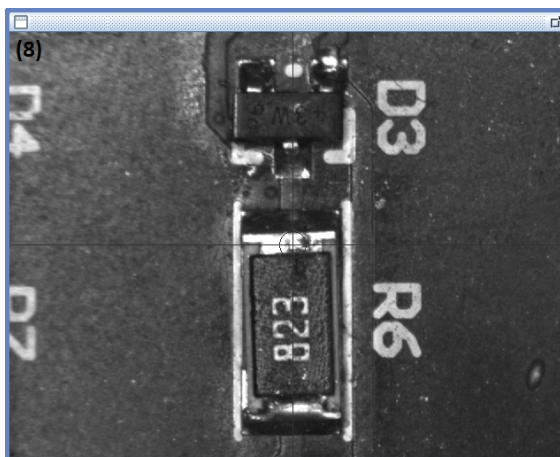


Figura 76 - Camera Viewer - GUIP

4.4.2 Módulos da S2iAOI

A máquina S2iAOI foi projetada e dividida em módulos com o objetivo de separar as principais funções da máquina em conjuntos. Cada módulo reúne funções (métodos) que possuem objetivos em comum, como por exemplo, controlar os eixos da máquina. Para o bom funcionamento da máquina é necessário que estes módulos se relacionem entre si. Estas relações podem ser observadas na Figura 77.

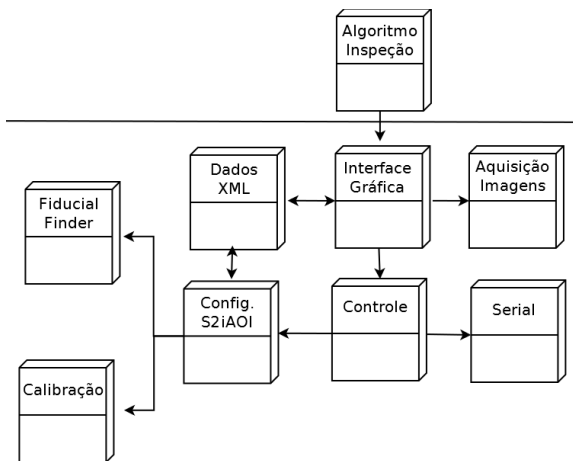


Figura 77 - Módulos da S2iAOI

Controle: responsável pelo controle e acionamento dos eixos da máquina e do *conveyor*. Este módulo contém métodos que determinam a quantidade de passos que os motores devem girar para que os eixos atinjam uma posição desejada.

Serial: este módulo realiza a comunicação entre o computador e microcontrolador, através do protocolo de comunicação serial RS-232.

Aquisição Imagens: responsável pela aquisição das imagens. Este módulo contém métodos nativos que se comunicam com a câmera, adquirindo e configurando a câmera da S2iAOI.

Dados XML: este módulo possui métodos que geram e leem dados dos arquivos XML da máquina. Os arquivos XML possuem dados das placas, pontos (coordenadas X, Y e Z) para a aquisição das imagens, lista de algoritmos que serão inspecionados em cada ponto, parâmetros das inspeções, tais como, tempo de exposição e ganho da máquina, iluminação, entre outros.

Algoritmo Inspeção: neste módulo serão desenvolvidos os algoritmos de inspeção da S2iAOI, que se comunicará com a máquina através dos arquivos XML e através de uma interface gráfica, para que o usuário possa configurar os parâmetros da inspeção.

Config. S2iAOI: este módulo é formado por dois submódulos: **Fiducial Finder** e **Calibração**. O módulo **Fiducial Finder** contém os métodos que localizam automaticamente as marcas fiduciais da placa e, conseqüentemente, o ponto zero da placa em relação ao zero da máquina. Já o módulo **Calibração** contém os métodos que realizam a

calibração dos eixos X e Y da S2iAOI, gerando a relação pixel/milímetro de cada eixo.

Interface Gráfica: responsável por fornecer ao operador um fácil acesso às principais funcionalidades da máquina, proporcionando uma amigável interface entre ele e a máquina.

4.4.3 Algoritmo de Calibração

Para encontrar a relação de *pixel* por milímetros dos eixos X e Y da máquina, realiza-se a calibração através de uma das marcas fiduciais.

A calibração é realizada através de duas imagens de uma marca fiducial deslocadas nos eixos X e Y por uma distância conhecida em milímetros. Em seguida, verifica-se quantos *pixels* o centro da marca foi deslocado (para cada eixo) e, por fim, calcula-se a relação pixel por milímetro, finalizando o processo de calibração.

A calibração deve ser feita quando o operador da máquina está realizando a programação da inspeção através da placa *golden*. A Figura 78 mostra a interface gráfica da calibração. Antes de abrir interface gráfica, deve-se posicionar a câmera de modo que a marca fiducial fique próxima ao centro da imagem.

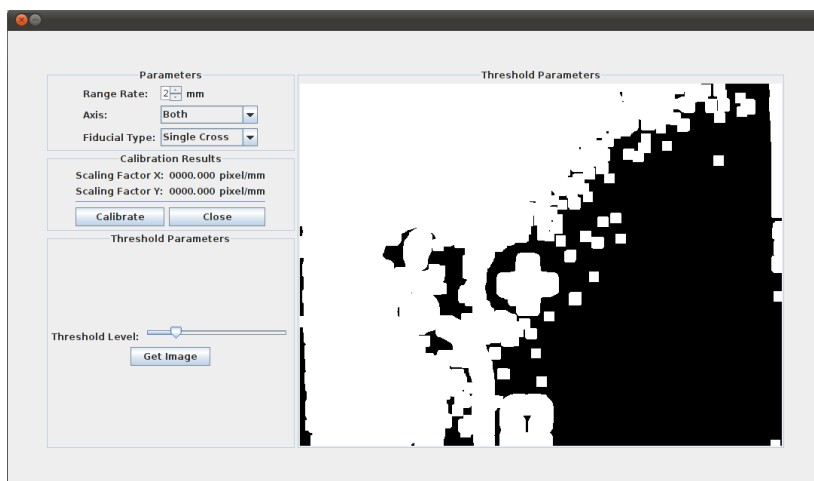


Figura 78 - Interface Gráfica da Calibração

Já na interface gráfica, ao clicar no botão **Get Image**, a imagem da placa será adquirida e um pré-processamento já será realizado. Este

pré-processamento binariza a imagem com o objetivo de destacar a marca fiducial (cruz) na imagem. Entretanto, nota-se na Figura 78 que nem sempre a marca fica muito visível ou, em volta dela, aparecem muitos pontos brancos, o que inviabilizaria o algoritmo da calibração. Para resolver isto, deve-se encontrar o limiar ideal, através do **Threshold Level**, tornando a imagem da marca mais visível e clara, conforme mostrado na Figura 79.

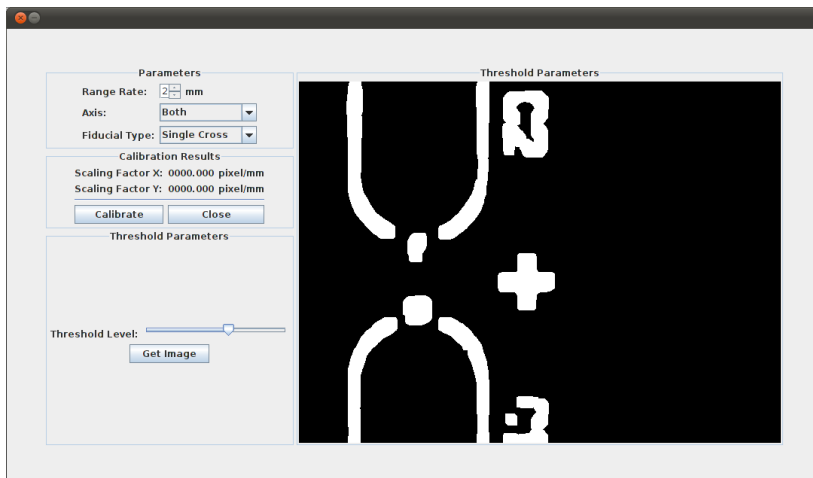


Figura 79 - Nível do limiar da binarização ajustado para a calibração

Os outros parâmetros que se deve observar são:

- **Range Rate:** Deslocamento da câmera para a aquisição da segunda imagem (em milímetros)
- **Axis:** Eixos que serão calibrados (X, Y ou Ambos)
- **Fiducial Typte:** Tipo da fiducial (atualmente apenas *Single Cross*)

Para iniciar o algoritmo da calibração, clica-se no botão **Calibrate**. O algoritmo binariza a imagem com o nível de limiar ajustado e localiza a região da marca fiducial. Em seguida, procura a localização dos *pixels* das extremidades da marca, tanto para o eixo X quanto para o eixo Y (x_{max} , x_{min} , y_{min} e y_{max}), conforme ilustrado na Figura 80.

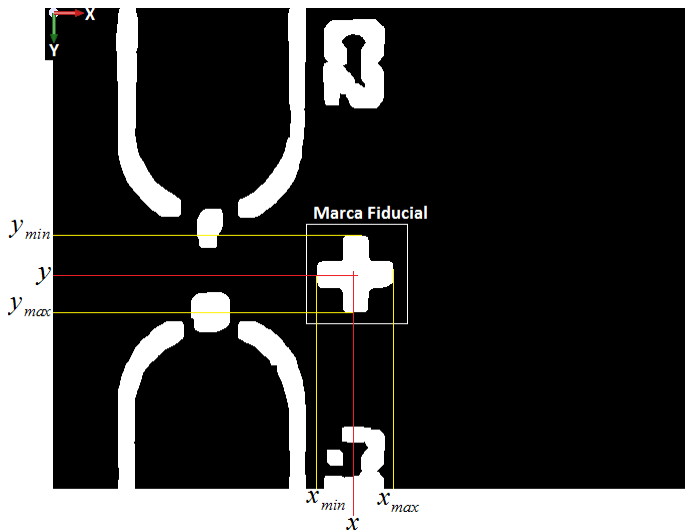


Figura 80 - Localização do centro da marca fiducial

Para determinar o ponto central $P_1(x_1, y_1)$ da imagem 1 (antes da movimentação), basta calcular a diferença das coordenadas máximas e mínimas e dividir por dois, encontrando a coordenada média, conforme mostra as Equações 7 e 8.

$$x_1 = (x_{max} - x_{min}) / 2 \quad (7)$$

$$y_1 = (y_{max} - y_{min}) / 2 \quad (8)$$

Em seguida, a câmera é movimentada e repete-se o algoritmo descrito acima. Desta forma, obtém-se o ponto central $P_2(x_2, y_2)$ referente à marca imagem 2. Para calcular o fator de escala (**Scaling Factor**) de cada eixo, calcula-se a diferença das coordenadas dos pontos encontrados e divide-se pela distância do deslocamento, conforme mostram as Equações 9 e 10.

$$ScaleFactorX = \frac{x_2 - x_1}{RangeRate} \quad (9)$$

$$ScaleFactorY = \frac{y_2 - y_1}{RangeRate} \quad (10)$$

O resultado da calibração é mostrado na interface gráfica, conforme ilustrado na Figura 81 e seus valores são salvos no arquivo XML da inspeção. Estes valores serão utilizados para encontrar as marcas fiduciais da placa *golden* e das placas para inspeção. Outra utilidade para os fatores de escala estão na interface gráfica principal. Quando se deseja movimentar a câmera clicando num ponto da imagem que está sendo mostrada em tempo real, calcula-se a distância (em pixel) do centro da imagem para o ponto clicado e converte-se essa distância numa coordenada em milímetros, na qual a câmera irá se posicionar.

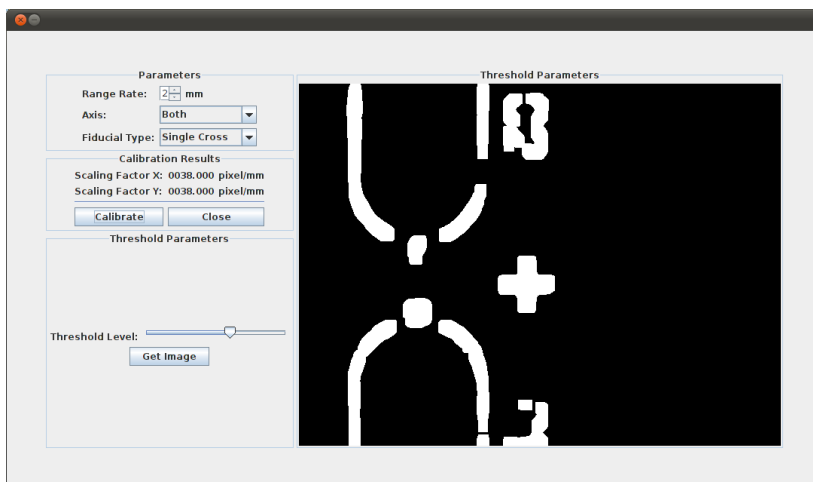


Figura 81 - Resultado na calibração na interface gráfica (*Calibration Results*)

4.4.4 Algoritmo *Fiducial Finder*

O algoritmo *Fiducial Finder* é responsável por referenciar a placa em relação às posições absolutas dos eixos X e Y. Para isto, ele encontra as posições dos centros das marcas fiduciais e calcula a posição zero (0,0) da placa.

Ao efetuar a programação de inspeção de uma PCI através de uma placa *golden*, deve-se informar, pela interface gráfica do *Fiducial Finder* (ver Figura 82), a posição das marcas fiduciais. Para isto, deve-se movimentar a câmera e posicioná-la de modo que a marca fiducial fique próxima ao centro da imagem. Clicando no *check-box* da marca correspondente, os campos da posição temporária da marca serão automaticamente preenchidos.

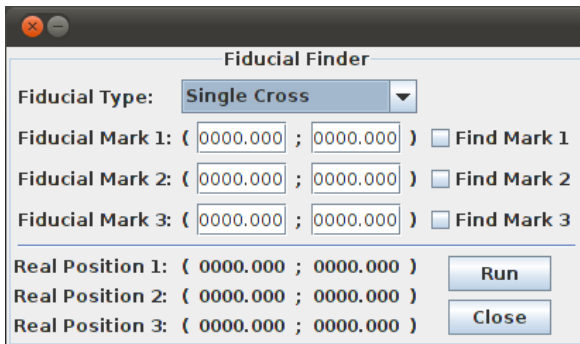


Figura 82 - Interface gráfica do algoritmo *Fiducial Finder*

Após encontrar as posições temporárias das marcar fiduciais (duas ou três), clica-se no botão **Run** para iniciar o algoritmo *Fiducial Finder*. Este algoritmo utiliza o mesmo processo da calibração para encontrar o centro da marca fiducial. Quando o centro da marca fiducial é encontrada, calcula-se a distância em *pixels* do centro da marca ao centro da imagem, conforme ilustrado na Figura 83.

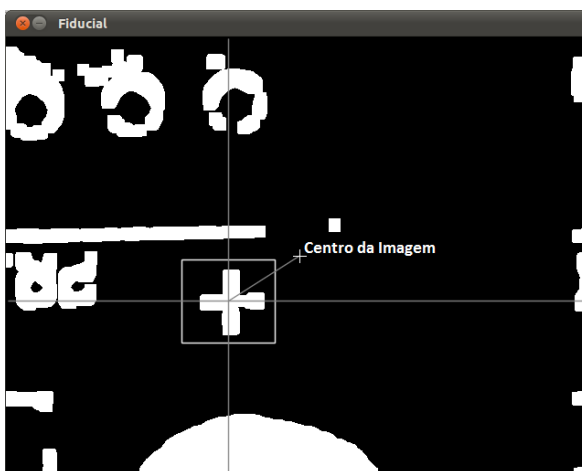


Figura 83 - Algoritmo *Fiducial Finder*

Esta distância é convertida para milímetros e a câmera é movimentada com o objetivo de coincidir os dois centros. Repete-se novamente o processo descrito acima até que o centro da marca fiducial

coincida com o centro da imagem, encontrando a posição real da marca fiducial.

Com a posição real de todas as marcas fiduciais é possível determinar a posição zero da placa. Esta posição é calculada conforme a quantidade de marcas fiduciais.

4.4.4.1 Posição zero da placa com três marcas fiduciais

A posição zero de uma placa com três marcas fiduciais é a mesma posição do centro da marca fiducial $P_3(x_3, y_3)$, ilustrada na Figura 84. As outras duas marcas, que estão localizadas nos eixos X e Y a partir da posição zero, são utilizadas para determinar o ângulo de rotação θ .

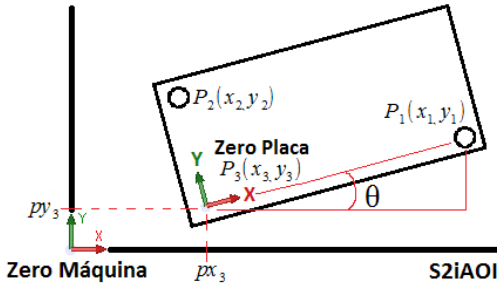


Figura 84 - Posição zero da placa com três marcas fiduciais

Para converter a posição relativa $P_r(x_r, y_r)$ (referenciada com a posição zero da placa) na posição absoluta $P_a(x_a, y_a)$ (referenciada com a posição zero da máquina), aplica-se a matriz de transformação, mostrada na Equação 11.

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta & px_3 \\ \text{sen} \theta & \cos \theta & py_3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

4.4.4.2 Posição zero da placa com duas marcas fiduciais

Quando a placa possui apenas duas marcas fiduciais não é possível determinar o ângulo de rotação da placa, pois a distância entre elas não é conhecida. Desta forma, o ponto zero da placa é encontrado obtendo o menor valor de X e Y das posições reais das marcas fiduciais (ver Figura 85) e o ângulo de rotação da placa é considerado zero.

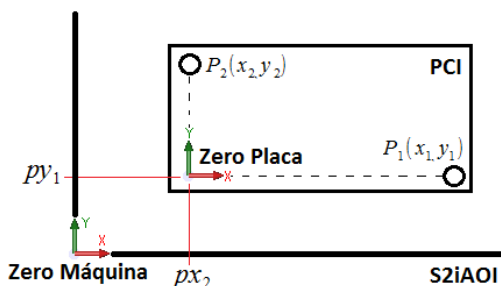


Figura 85 - Posição zero da placa com duas marcas fiduciais

Aplicando as coordenadas px_2 , py_1 e $\theta=0$ na matriz de transformação, temos:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & px_2 \\ 0 & 1 & py_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Usando a Equação 12, calcula-se a posição absoluta da máquina através de uma posição referenciada pelo zero da placa.

4.4.5 Arquivo XML da inspeção de uma placa

O arquivo XML é gerado durante a programação de uma inspeção através da placa *golden* e contém todos os dados necessários para que a máquina S2iAOI realize a inspeção. A nomenclatura deste arquivo é definida a partir do Identificador (**ID**) da placa e do número da versão (**Version**) do programa. Além disso, recebe a extensão *.aoi* para que

fique mais fácil identificar este arquivo como sendo de uma inspeção. A Figura 86 mostra o exemplo de um arquivo simplificado, em seguida, serão descritos cada nó.

```
-<S2iAOI>
+<PCB ID="0" Version="3"></PCB>
+<GoldenImages NumGoldenImages="4"></GoldenImages>
</S2iAOI>
```

Figura 86 - Arquivo de inspeção PCB_ID0V3.aoi simplificado

Através da Figura 86 é possível notar o código de identificação da placa $ID=0$ e o número da versão do programa $Version=3$ no nó **PCB**. Já no nó **GoldenImages** nota-se a quantidade de posições que se deve inspecionar ($NumGoldenImages=4$).

Os dados referentes à calibração, ao algoritmo *Fiducial Finder* e à placa são encontrados expandindo o nó **PCB**, conforme ilustra a Figura 87.

```
-<PCB ID="0" Version="3">
  <Width>115.55</Width> (1)
  <FactorScaleX>43.0</FactorScaleX>
  (2)<FactorScaleY>43.0</FactorScaleY>
  { <ThresholdLevel>167</ThresholdLevel>
    <FiducialGain>350</FiducialGain>
    <FiducialExposure>409</FiducialExposure>
  }
  <Address>/home/daniel/workspace/S2iAOI/S2iGUI/</Address> (4)
  (3)<NumFiducials>2</NumFiducials>
  <NumGoldenImg>4</NumGoldenImg> (5)
  -<FidMark1>
    <PositionX>200.621</PositionX>
    <PositionY>75.623</PositionY>
    <PositionZ>-171.93</PositionZ>
  </FidMark1>
  -<FidMark2>
    <PositionX>28.366</PositionX>
    <PositionY>128.26</PositionY>
    <PositionZ>-171.93</PositionZ>
  </FidMark2>
  -<FidMark3>
    <PositionX>28.366</PositionX>
    <PositionY>75.623</PositionY>
    <PositionZ>-171.93</PositionZ>
  </FidMark3>
</PCB>
```

Figura 87 - Arquivo de Inspeção: Expansão do nó **PCB**

1. Elemento **Width** → Largura da placa em milímetros
2. Dados da Calibração
 - Elemento **FactorScaleX** → Fator de escala do eixo X
 - Elemento **FactorScaleY** → Fator de escala do eixo Y
 - Elemento **ThresholdLevel** → Nível de limiar (binarização)
3. Dados para o algoritmo Fiducial Finder
 - Elemento **FactorScaleX** → Fator de escala do eixo X
 - Elemento **FactorScaleY** → Fator de escala do eixo Y
 - Elemento **ThresholdLevel** → Nível de limiar (binarização)
 - Elemento **FiducialGain** → Ganho da câmera
 - Elemento **FiducialExposure** → Tempo de exposição do sensor da câmera
 - Elemento **FidMark1** → Posição temporária da marca fiducial 1 (usada localizar a posição real da marca)
 - Elemento **FidMark2** → Posição temporária da marca fiducial 2 (usada localizar a posição real da marca)
 - Elemento **FidMark3** → Posição temporária da marca fiducial 3 (usada localizar a posição real da marca). Quando a placa contém apenas duas marcas fiduciais, este elemento é preenchido com a posição zero da placa.
4. Elemento **Address** → Localização dos arquivos (imagens golden e das placas inspecionadas)
5. Elemento **NumGoldenFiducial** → Contém o número de posições que se deve inspecionar (usado para gerar o nó **GoldenImages**)

Os dados referentes aos algoritmos de inspeção ficam salvos no nó **GoldenImages**. Para cada posição de inspeção (**GoldenImages**) existe um elemento com o nome da posição (**Name**) e outros três com a posição relativa (**Position[X, Y e Z]**) e um nó, cujo parâmetro contém o número de defeitos inspecionados (**Defects**), conforme ilustrado na Figura 88.

```

--<GoldenImages NumGoldenImages="4">
- <Img1>
  <Name>Img1</Name>
  <PositionX>0.0</PositionX>
  <PositionY>0.0</PositionY>
  <PositionZ>.171.93</PositionZ>
  + <Defects NumDefects="1"></Defects>
</Img1>
+ <Img2></Img2>
+ <Img3></Img3>
+ <Img4></Img4>
</GoldenImages>

```

Figura 88 - Arquivo de Inspeção:
Expansão do nó *GoldenImages*

A Figura 89 mostra o nó *Defects* expandido. Nela pode-se notar o nó *Defect[Img#]*, onde “*Img#*” representa o nome da posição, neste caso *Img1*. Além disso, este nó contém o código (*Type*) do defeito que será inspecionado (0-*Missing*, 1-*Wrong*, 2-*Polarity* e 3-*Shift*). Os elementos deste nó são os parâmetros do algoritmo de inspeção para o respectivo defeito.

```

--<Defects NumDefects="1">
--<DefectImg1 Type="0">
  <Gain>350</Gain>
  <ExposureTime>409</ExposureTime>
  <Center>false</Center>
  <Module1>true</Module1>
  <Module2>false</Module2>
  <Module3>false</Module3>
  <Module4>false</Module4>
  <Module5>false</Module5>
</DefectImg1>
</Defects>

```

Figura 89 - Arquivo de Inspeção:
Expansão do nó *Defects*

Como nenhum algoritmo de inspeção foi desenvolvido até o momento, os únicos parâmetros são:

- *Gain* → Ganho da câmera;
- *ExposureTime* → Tempo de exposição do sensor da câmera;
- *Center* → Módulo de iluminação central (*true* = ligado, *false* = desligado);
- *Module[1,2,3,4,5]* → Módulos laterais 1, 2, 3, 4 e 5.

Ao carregar e rodar o arquivo de inspeção, a máquina carrega as posições das marcas fiduciais e, em seguida, roda o algoritmo ***Fiducial Finder*** para localizar a posição real delas, referenciando a placa que será inspecionada. Feito isto, a câmera é posicionada em cada posição de inspeção e, para cada defeito, uma imagem é adquirida com os parâmetros correspondentes.

Desta forma, os algoritmos de inspeção terão à disposição, para cada posição e defeito, uma imagem de referência (imagem *golden*) e outra imagem que deve ser inspecionada, obtidas com os mesmos parâmetros e a mesma iluminação.

5 RESULTADOS

A construção da máquina de inspeção S2iAOI ocorreu como o esperado. Grande parte das peças utilizadas foram padronizadas e de fácil acesso no mercado brasileiro. A fácil movimentação de toda a máquina através dos rodízios instalados em seus pés, viabiliza sua mobilidade pelo chão de fábrica para que seja possível fazer a inspeção em todas as etapas da linha de montagem SMT. A Figura 90 mostra como ficou a montagem final da máquina S2iAOI.



Figura 90 - Máquina de Inspeção S2iAOI

O projeto inicial do *conveyor* teve que ser refeito para a proposta mostrada nesta dissertação, pois o primeiro projeto mostrou-se instável (travava na movimentação quando a largura era ajustada), durante a montagem. Outro problema apresentado foi nas esteiras, pois os esticadores não funcionaram como deveriam. O reprojeto ainda não foi construído devido à falta de material e de recurso humano para usinar as peças necessárias. Os fatos positivos são que a altura do *conveyor* na máquina garantirá a compatibilidade da S2iAOI com as outras máquinas da linha de montagem SMT e o ajuste da largura automático permitirá a inspeção de placas que variem de 50mm a 500mm .

A máquina mostrou ter grande flexibilidade para a troca do sistema de iluminação e de aquisição de imagens. Novos projetos de

sistemas de iluminação, mais eficientes do que os mostrados neste trabalho, já começaram a ser desenvolvidos em outros trabalhos de mestrado e de graduação.

Alguns algoritmos de inspeção estão sendo testados na S2iAOI dentro da proposta apresentada e os resultados estão sendo satisfatórios. O único problema apresentado no teste foi o sistema de iluminação, que já está sendo resolvido com o novo projeto. Acredita-se que algumas situações (etapas de inspeção e/ou defeito inspecionado) necessitará de uma adaptação no sistema de iluminação.

A interface gráfica tem se mostrado intuitiva e de fácil aprendizado. Novos estudantes começaram a trabalhar com a S2iAOI e não apresentaram dificuldades de entender e de fazer funcionar a máquina.

Como todo o projeto da máquina foi realizado com arquitetura aberta, novas atualizações poderão ser realizadas, tanto no projeto mecânico e eletroeletrônico quanto no *software*. Algumas atualizações necessárias já foram observadas e serão apresentadas nas perspectivas de trabalhos futuros.

A arquitetura aberta e o sistema de arquivo XML de inspeção permitirá a agentificação da máquina. O arquivo pode ser enviado para outro agente e ser modificado. Essa modificação pode ser realizada, alterando, por exemplo, parâmetros da inspeção, para que falsos positivos ou falsos negativos sejam corrigidos automaticamente durante o processo de montagem. Ou ainda, os resultados da inspeção poderão ser enviados para um sistema especialista que analisará a causa da falha e proporá possíveis soluções para que os erros possam ser corrigidos antes de iniciar uma nova montagem (VARGAS, 2012).

Para os testes da S2iAOI, utilizou-se placas com fiduciais na forma de cruz simples, portanto, os algoritmos desenvolvidos (Calibração e *Fiducial Finder*) tiveram como base este tipo de marca, apresentada na Figura 91.



Figura 91 - Forma da marca fiducial utilizada para os testes da S2iAOI

5.1 RESULTADOS DO ALGORITMO CALIBRAÇÃO

O algoritmo da calibração dos eixos X e Y da máquina foi testado calibrando-a diversas vezes, mantendo inalterada a posição do eixo Z e deslocando os eixos $2mm$ (Parâmetro *Range Rate*). Idealmente, os valores da calibração, para este caso, deveriam ser iguais. Porém, o teste mostrou que há variação entre uma calibração e outra. Estas variações podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados dos testes da calibração

	Resolução (<i>pixels/mm</i>)	
	Eixo X	Eixo Y
Teste 01	44	44
Teste 02	45	44
Teste 03	44	45
Teste 04	44	45
Teste 05	43	46
Teste 06	45	44
Teste 07	45	44
Teste 08	42	38
Teste 09	41	36
Teste 10	44	45
Teste 11	45	45

Teste 12	45	44
Média	43.91	43.33
Desv. Padrão	1.31	3.05

As variações dos fatores de escalas dos eixos X e Y observadas na Tabela 6, apesar de apresentarem uma pequena taxa de variação, podem influenciar diretamente o algoritmo *Fiducial Finder*. Entretanto, este resultado está satisfatório para os primeiros testes, mas recomenda-se trabalhar mais a fundo no desenvolvimento de um algoritmo mais eficiente.

5.2 RESULTADOS DO ALGORITMO *FIDUCIAL FINDER*

Para testar o algoritmo *Fiducial Finder* utilizou-se duas abordagens. A primeira, a placa (com duas marcas fiduciais) ficou posicionada sempre da mesma forma (sem movimentá-la fisicamente). Em seguida, repetiu-se oito vezes todo o processo para localizar a posição real da marca fiducial. A Tabela 7 mostram as posições reais encontradas para X e Y das marcas fiduciais.

Tabela 7 – Dados dos testes das posições das marcas fiduciais

	Fiducial 1		Fiducial 2	
	Posição X (mm)	Posição Y (mm)	Posição X (mm)	Posição Y (mm)
	202.483	75.233	30.109	127.421
	202.506	75.279	30.131	127.421
	202.344	75.256	29.949	127.169
	202.296	75.210	29.948	127.148
	202.251	75.370	30.016	127.148
	202.483	75.051	30.017	127.101
	202.298	75.232	29.994	127.398
	202.345	75.233	29.970	127.081
Média	202.376	75.233	30.017	127.236
Desvio Padrão	0.100	0.089	0.069	0.150

A Tabela 7 mostra que as posições reais encontradas para cada eixo e marca fiducial variaram entre 0.069mm a 0.150mm.

A segunda abordagem nos mostra visualmente o que essas variações das posições das marcas fiduciais afetam nas imagens referenciadas pelo zero da placa. Para isto, obteve-se uma imagem de referência (como se fosse a imagem *golden*) e, em seguida, a placa foi mudada de lugar fisicamente, localizou-se novamente a posição zero da placa e obteve-se uma imagem na mesma posição da imagem de referência. Repetiu-se esse processo por três vezes, totalizando quatro imagens que, supostamente, deveriam ter a mesma posição. Entretanto, notou-se um deslocamento dos componentes na imagem, conforme pode ser observado na Figura 92.

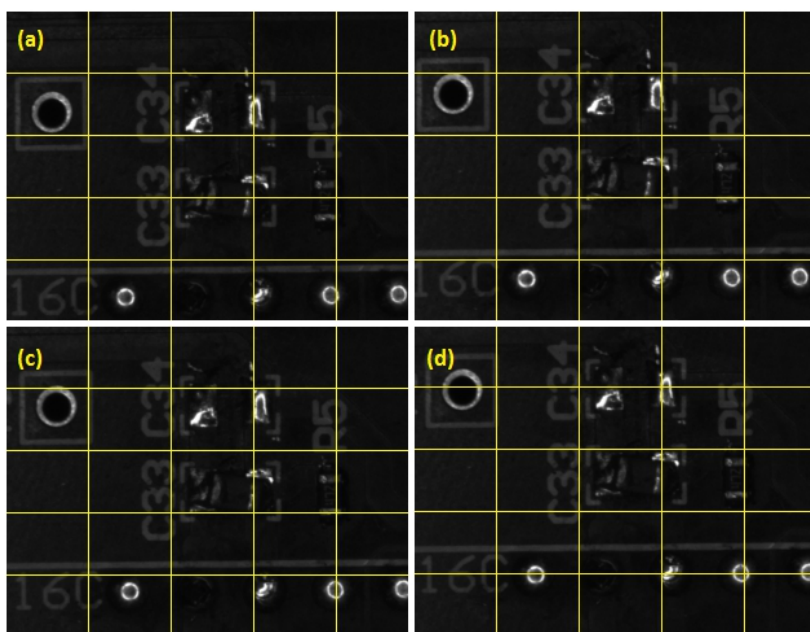


Figura 92 - Deslocamento das imagens com a mesma posição de referência. (a) Imagem de referência. (b) (c) (d) Imagens de teste

Os resultados mostrados acima foram satisfatórios para o teste piloto da máquina. Geralmente, os algoritmos de inspeção de PCIs, baseados em imagens de referências, ajustam as imagens de teste para que os componentes que serão inspecionados fiquem na mesma posição que estão na imagem de referência.

Atualmente, já estão sendo desenvolvidos algoritmos de inspeção para a máquina S2iAOI e, até agora, os testes têm se mostrado satisfatórios, usando as imagens geradas pela máquina.

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, verificou-se os problemas causados por uma Produção em Pequenas Séries, principalmente na indústria manufatureira de Placas de Circuito Impresso, e desenvolveu-se uma máquina de inspeção para estas placas com o objetivo de reduzir o tempo de *setup* e maximizar flexibilidade na linha de montagem.

O projeto mecânico e eletroeletrônico foram desenvolvidos a baixo custo e com componentes padronizados. Além disso, todo o *software* foi desenvolvido com arquitetura aberta, tornando o projeto da S2iAOI replicável e pode ser modificado de acordo com a necessidade.

O *software* da S2iAOI foi desenvolvido para possibilitar a inserção de novos algoritmos de inspeção, sendo possível ampliar a cobertura de defeitos da máquina.

A configuração da máquina é fácil e simples de se realizar. Novos alunos estão aprendendo a utilizar a máquina de forma intuitiva, sem apresentarem grandes problemas. A forma de realizar a programação de uma inspeção, apresentada nesta dissertação, tem se mostrado eficiente com os novos algoritmos de inspeção que estão sendo desenvolvidos.

Outra vantagem desta máquina é a possibilidade de integrá-la com outros sistemas (programas de computadores) através de Sistemas Multiagentes. Desta forma, pode agilizar e automatizar os resultados obtidos na inspeção e tomar as decisões necessárias em tempo real, com o objetivo de arrumar os parâmetros da produção para que a próxima placa produzida não contenha os mesmos defeitos.

6.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

Ao longo do desenvolvimento da máquina de inspeção de PCIs produzidas em pequenas séries, surgiram algumas questões que precisam ser resolvidas para que a máquina atinja seu principal objetivo: atuar numa linha de montagem SMT de pequenas séries. A seguir, sugere-se algumas propostas de trabalhos futuros para um contínuo melhoramento da máquina:

- melhorar o sistema de movimentação e controle dos eixos da máquina, como por exemplo servo motores, tornando-a mais eficiente no posicionamento;

- melhorar o circuito de intertravamento, adicionando os sinais que indicam falha nos *drivers* dos motores de passo;
- gerar um sinal do circuito de intertravamento para que o microcontrolador possa identificar, caso haja alguma falha e, conseqüentemente, informar o usuário da falha através da interface gráfica;
- implementar e testar o *conveyor* projetado;
- desenvolver um algoritmo de calibração mais eficiente;
- desenvolver um algoritmo para encontrar o ponto zero da placa com maior precisão, estudando como as máquinas de inserção fazem para localizar esta posição através das marcas fiduciais das placas;
- integrar o arquivo CAD *pick&place* da placa que contém informações das posições dos componentes na placa. Desta forma, será possível programar a inspeção através da seleção dos componentes desejado;
- agentificar a máquina para que ela possa se comunicar com outros agentes, fornecendo informações das inspeções realizadas. Este estudo já está sendo realizado numa proposta de doutorado do programa BRAGECRIM;
- implementar algoritmos de inspeção para a etapa, após a inserção manual dos componentes. Projeto que também já está sendo desenvolvido numa proposta de mestrado do programa BRAGECRIM;
- desenvolver sistemas de iluminação mais eficientes;
- estudar melhorias no projeto mecânico e eletroeletrônico da máquina.

Através da lista de trabalhos futuros citados acima, muita coisa deve ser feita para tornar a máquina funcional numa linha de montagem SMT. Entretanto, com o contínuo desenvolvimento da máquina inserida na proposta do projeto BRAGECRIM, acredita-se que ela poderá contribuir com a produção de pequenas séries na linha de montagem de SMT, tornando-a mais eficiente e com o menor tempo de *setup* para realizar a inspeção de um lote de placa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LIU, C.-ming; WU, W.-yen; WANG, M.-jim J. *Automated inspection of printed circuit boards through machine vision*. Computers in Industry. pp.103-111.1996
- BAUHOFF, F.; HERING, N. & SCHMIDT, C.. *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Wissenschaftler der RWTH Aachen stärken den Wettbewerbsstandort Deutschland. Unternehmen der Zukunft - Schwerpunkt Produktionsmanagement, UdZ 1/2010:15-16, 2010.
- MICHAELI, Walter; HABERSTROH, Edmund; KRUMPHOLZ, Thorsten; LETTOWSKY, Christoph; LÜTZELER, Reiner & SCHMITZ, Torsten. *Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Kunststoffe, 2007.
- BURR, D. **Solder Paste Inspection : Process Control for Defect Reduction**. In International Test Conference. IEEE Computer Society, 1997.
- DORO, M. M. **Solução integrada para auxiliar na garantia da qualidade na produção em pequenos lotes**. Tese de Doutorado. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- MONFARED, R.P. et al. *Flexible Soldering Cells for Small Batch Productions*. In Electronics Packaging Technology Conference. pp. 249-254. 2006.
- SCHUH, G.; KLOCKE, F.; BRECHER, C.; SCHMITT, R.. *Excellence in Production*. Aachen: Apprimus-Velag. 1st edition. 2007.
- SCHMITT, R.; PAVIM, A. *Flexible Inspection of Small Series Production Systems through the Use of Dynamic Sensor Fusion Principles*. In P. Scharff, ed. Proceedings of the 53 IWK International Scientific Colloquium Prospects in Mechanical Engineering. Verlag ISLE, pp. 335-336. 2008.
- JADHAV, S. A. *Setup approval and self starting schemes for short production runs*. 103 p. Tese (Doutorado) — University of Pune, 2005.
- JURAN, J. M.; GODFREY, A. B.; HOOGSTOEL, R. E.; SCHILLING, E. G. *Juran's Quality Handbook*. 5rd Edition, USA: McGraw-Hill, Inc, 1998.
- WHEELER, D. J. *Short Run SPC*. Knoxville, TN: SPC Press Inc, 1991.

HITOMI, K. *Manufacturing system engineering: a unified approach to manufacturing technology, production management, and industrial economics*. [S.l.]: Taylor and Francis. 536 p. 1996.

LINK, A.N., 1997. *Early Stage Impacts of the Printed Wiring Board Joint Venture*. Disponível em: <<http://www.atp.nist.gov/eao/pwbrpt.htm>>. Acessado em 15 de março de 2011.

DORO, M.M., 2004. *Sistemática para Implantação da Garantia da Qualidade em Empresas Montadoras de Placas de Circuito Impresso*. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina.

MELO, P.R. de S.; RIOS, E.C.D.R.; GUTIERREZ, R.M.V. *Placas de circuito impresso: mercado atual e perspectivas*, Rio de Janeiro. 2001.

FUSETTN, 1999. *Printed Circuit Board and Surface Mount Design*. Disponível em: <<http://www.fuse-network.com/fuse/training/index.html>>. Acessado em: 23 de setembro de 2011.

MOGANTI, M. et al. *Automatic PCB Inspection Algorithms: A Survey*. Computer Vision and Image Understanding, pp.287–313. 1996.

SUNDARAJ, K. *Automated Visual Inspection for Missing or Misaligned Components in SMT Assembly*. pp.109–115. 1996.

LIAO, C.-T., LEE, W.-H., LAI, S.-H. *A Flexible PCB Inspection System Based on Statistical Learning*. Journal of Signal Processing Systems, 67(3), pp.279–290. 2010.

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, Outubro, 1998.

IPC-7351. *Association Connecting Electronics Industries: Generic Requirements for Surface Mount Design and Land Pattern Standard*. Bannockbur, 92p. 1999.

GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. Reading, MA: Addison-Wesley, 716p. 1992.

PAVIM, X.A., ROLOFF, L.M.. *Curso de Processamento e Análise de Imagens*. ENEC. Florianópolis. 2005.

FILHO, O.M., NETO, H.V. *Processamento Digital de Imagens*. Rio de Janeiro: Brasport. 1999.

SMT_IN_FOCUS. *SMT Failure Library*. Disponível em: <http://www.smtinfocus.com/smt_failure_list.html>. Acesso em: 03 de março de 2011.

VARGAS, J. *Sistema Especialista de Diagnóstico e Tomada de Decisão para Garantia de Qualidade na Produção de Placas de Circuito Impresso em Pequenas Séries*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.

BACK, N. . *Metodologia de Projeto de Produtos Industriais*. 1a.. ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara Dois, 1983. v. 1. 399p.

NOLL, V.; SOUZA, A. R. de; KUWAKINO, E. S.; MULLER, A. A.; *Desenvolvimento de Hardware para Aquisição e Sinais de Medição com Arquitetura Aberta e de Baixo Custo para Aplicações em Supervisão e Controle de Processos*. V CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA para a competitividade em áreas estratégicas de 9 a 13 de novembro de 2009. Salvador, Bahia – Brasil.

OBR. *OBR Equipamentos Industriais Ltda*. Disponível em: <www.obr.com.br>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2011.

KALATEC. *Kalatec Automação*. Disponível em <www.kalatec.com>. Acesso em 12 de março de 2011.

LABELECTRON. *Laboratório LABelectron – Fundação CERTI*. Disponível em <<http://www.labelectron.org.br>>. Acesso em 13 de março de 2011.

TPCA. *Taiwan Printed Circuit Association – World PCD Production*. Disponível em <http://www.tpcas.org.tw/download.aspx?dlfn=TPCAShow_Market.pdf>. Acesso em 26 de fevereiro de 2011.

OPENCVWIKI. *OpenCV Wiki*. Disponível em <<http://code.opencv.org/projects/opencv/wiki>>. Acesso em: 26 de junho de 2011.

LIANG, S. *The Java Native Interface: Programmer's Guide and Specification*. First Edition. Addison-Wesley, ed., California: Sun Microsystems, Inc. 1999. Disponível em <<http://java.sun.com/docs/books/jni/>>. Acesso em 29 de janeiro de 2011.