

**DAS** Departamento de Automação e Sistemas  
**CTC** **Centro Tecnológico**  
**UFSC** Universidade Federal de Santa Catarina

# **Desenvolvimento de Protótipos para Inspeção Utilizando Sistemas de Visão**

*Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação da disciplina:*

***DAS 5511: Projeto de Fim de Curso***

***Carlos Aurélio Pezzotta***

*Florianópolis, Maio de 1999*

# **Desenvolvimento de Protótipos para Inspeção Utilizando Sistemas de Visão**

***Carlos Aurélio Pezzotta***

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina  
**DAS 5511: Projeto de Fim de Curso**  
e aprovada na sua forma final pelo  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial**

Banca Examinadora:

Cédric Craze  
Orientador na Empresa

Prof. Carlos Alberto Flesch  
Orientador do Curso

Prof. Augusto Humberto Bruiciapaglia  
Responsável pela disciplina e Coordenador do Curso

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Avaliador

André Dias de Oliveira, Debatedor

Allan Celestino da Silva, Debatedor

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, Carlos Roberto Pezzotta e Nícia Scuoteguazza Pezzotta, e minha irmã, Valéria Cristina Pezzotta, pelo apoio e incentivo irrestrito ao longo desses cinco anos de estudo.

À Hahntel do Brasil – divisão Pollux Sistemas Industriais de Visão – pelo apoio e estrutura concedidos para a concretização deste trabalho.

Ao Professor Carlos Alberto Flesch, pela orientação e pelo sincero empenho para a realização desta monografia.

Ao Analista de Sistemas Cédric Craze pela ajuda e orientação na área técnica contribuindo para a concretização deste trabalho.

Aos amigos e colegas de trabalho Aderman Pellisson e Ricardo Carboneri pela inestimável ajuda no aprendizado e no desenvolvimento deste trabalho.

À minha namorada Analucia Vieira Fantin, pelo amor, paciência e compreensão nos períodos onde a distância nos impedia de estarmos juntos.

Aos colegas do curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial pelo espírito de companheirismo. Em especial aos amigos:

César Henrique Ferreira Amêndola

Márcio Bittencourt Pires Jr.

Fabrizio Carlo Mezzari e

Alexandre Emanuel de Camargo

## Resumo

A inspeção e a medição são processos determinantes na garantia da qualidade de um produto. Dentro desse contexto se inserem os sistemas industriais de visão. Esses sistemas processam imagens rapidamente e fornecem informações para o controle de processos de fabricação ou outros equipamentos, tais como robôs e sistemas de controle de qualidade de produtos.

Diante disso delineou-se como uma frente para este trabalho o planejamento e desenvolvimento de três protótipos de ferramentas auxiliares para o processo de inspeção e medição baseado em visão.

Um desses protótipos é o “Line Check”, que se caracteriza por ser uma ferramenta com a função de detectar os pontos (pixeis) delimitadores/formadores de uma linha. Para melhorar o resultado desse processo de detecção é demonstrado um método de obtenção de resolução subpixel.

Outro protótipo desenvolvido é o “Locate Tool”, com a função de assegurar um correto posicionamento de regiões de interesse, em sistemas onde o posicionamento das peças a serem inspecionadas não é realizado de forma segura e está sujeito a pequenas variações quando em sistemas industriais de transporte.

O terceiro protótipo denominado “Morphology Analysis” é uma ferramenta capaz de realizar uma análise a nível morfológico e geométrico de quatro formas de grande incidência em sistemas de medição e inspeção. São elas: as linhas, os retângulos, as circunferências e elipses.

A implementação dos três protótipos é validada com a apresentação de casos práticos voltados para a aplicação industrial, atestando sua funcionalidade.

Além disso, baseado em informações da literatura, principalmente o “Guia para Expressão da Incerteza de Medição”, ou “ISO-GUM”, são propostas algumas diretrizes para a avaliação da incerteza de sistemas de medição. São listadas algumas dificuldades para esse tipo de análise no caso de sistemas de visão e é proposto um meio para a avaliação das principais fontes de incertezas incidentes.

## Abstract

Inspection and measurement are decisive processes in the warranting of the quality of a product. Within this context there are industrial systems of vision. Those systems process images quickly and supply information for the control of production processes or other equipment, such as robots and systems of quality control.

Before that the planning and development of three prototypes of auxiliary tools for the inspection process and measurement based on vision was delineated as a front for this work.

One of those prototypes is the "Line Check", which is characterized by being a tool with the function of detecting points (pixels) that delimit/shape a line. To improve the result of that detection process is demonstrated a method of obtaining a subpixel resolution.

Another developed prototype is the "Locate Tool", with the function of assuring a correct positioning of areas of interest, in systems where the positioning of the pieces to be inspected is not accomplished in a safe way and it is subject to small variations when in industrial transport systems.

The third prototype denominated "Morphology Analysis" is a tool capable to accomplish an analysis at morphologic and geometric levels in four shapes of great incidence in measurement and inspection systems. They are: lines, rectangles, circumferences and ellipses.

The implementation of the three prototypes is validated with the presentation of practical cases directed to the industrial application to attest its functionality.

Moreover, based on respective literature, mainly the "Guide for Expression of the Uncertainty in Measurement", or "ISO GUM" some guidelines are proposed for the evaluation of the measurement uncertainty systems. Some difficulties for that analysis are listed in the case of vision systems and a suggestion is given towards the evaluation of the main sources of incident uncertainties.

# Sumário

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	9
1.2 OBJETIVO GERAL .....	10
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
1.4 METODOLOGIA .....	10
1.5 A EMPRESA .....	11
1.6 TERMINOLOGIA .....	12
1.7 INFRA ESTRUTURA .....	12
1.8 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA .....	13
<b>CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 SISTEMAS DE VISÃO .....	14
2.2 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE VISÃO .....	14
2.3 TIPOS DE APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE VISÃO .....	16
2.3.1 <i>Garantia de Qualidade</i> .....	16
2.3.2 <i>Seleção e Classificação</i> .....	16
2.3.3 <i>Controle de Processo</i> .....	16
2.3.4 <i>Manipulação de Materiais</i> .....	16
2.3.5 <i>Monitoração</i> .....	17
2.3.6 <i>OCR (Optical Character Recognition) e Leitura de Código de Barras</i> .....	17
2.4 APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE VISÃO POR SETOR DA INDÚSTRIA .....	17
2.4.1 <i>Sistemas Industriais de Visão nas Indústrias Alimentícia e de Bebidas</i> .....	17
2.4.1.1 <i>Aplicações Mais Frequentes</i> .....	18
2.4.2 <i>Sistemas Industriais de Visão na Indústria Farmacêutica</i> .....	19
2.4.2.1 <i>Aplicações Mais Frequentes</i> .....	19
2.4.3 <i>Sistemas Industriais de Visão na Indústria Metal-Mecânica</i> .....	20
2.4.3.1 <i>Aplicações Mais Frequentes</i> .....	21
2.4.4 <i>Outros Setores</i> .....	21
2.4.4.1 <i>Indústria de Autopeças</i> .....	21
2.4.4.2 <i>Indústria de Plásticos e Borrachas</i> .....	22
2.4.4.3 <i>Indústria de Higiene e Limpeza</i> .....	22
2.4.4.4 <i>Indústria Química</i> .....	22
<b>CAPÍTULO 3: A FERRAMENTA “LINE CHECK”</b> .....	<b>23</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	23

3.2	DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA.....	24
3.3	APLICAÇÕES.....	26
3.4	RESOLUÇÃO PIXEL E SUBPIXEL.....	26
3.4.1	<i>Método Desenvolvido para Obtenção da Resolução Subpixel.....</i>	28
3.4.1.1	Observações.....	32
3.5	PAINEL FRONTAL DO PROTÓTIPO “LINE CHECK”.....	32
3.6	APLICAÇÃO PRÁTICA FINAL.....	34
3.7	CONCLUSÃO.....	35
<b>CAPÍTULO 4: A FERRAMENTA “LOCATE TOOL”.....</b>		<b>37</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	37
4.2	DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA.....	38
4.2.1	<i>Módulo de Calibração.....</i>	39
4.2.1.1	Referências Fechadas.....	41
4.2.1.2	Referências Abertas.....	44
4.2.2	<i>Módulo de Execução.....</i>	50
4.3	APLICAÇÕES.....	51
4.4	APLICAÇÃO PRÁTICA FINAL.....	52
4.5	CONCLUSÃO E DISCUSSÃO SOBRE OTIMIZAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	55
<b>CAPÍTULO 5: A FERRAMENTA “MORPHOLOGY ANALYSIS”.....</b>		<b>57</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	57
5.2	ANALISADOR DE LINHAS – “MORPHOLOGY LINE”.....	57
5.2.1	<i>Algoritmos Utilizados para a Análise.....</i>	58
5.2.1.1	Ajuste da Melhor Reta e Cálculo do Erro de Linearidade.....	58
5.2.1.2	Inclinação.....	59
5.2.1.3	Comprimento da Reta.....	59
5.2.2	<i>Aplicação Prática Final.....</i>	60
5.3	ANALISADOR DE RETÂNGULOS – “MORPHOLOGY RECTANGLE”.....	61
5.3.1	<i>O “Localizador de Retângulos”.....</i>	61
5.3.1.1	O Algoritmo do “Localizador de Retângulos”.....	61
5.3.1.2	O Algoritmo de Busca Bidirecional.....	64
5.3.2	<i>Algoritmos Utilizados para a Análise.....</i>	65
5.3.2.1	Largura e Altura.....	65
5.3.2.2	Erros de Conformidade.....	65
5.3.2.2.1	Erro de Conformidade Linear.....	65
5.3.2.2.2	Erro de Conformidade Angular.....	65
5.3.3	<i>Aplicação Prática Final.....</i>	66
5.4	ANALISADOR DE CIRCUNFERÊNCIAS E ELIPSES – “MORPHOLOGY CIRCLE”.....	69
5.4.1	<i>O “Localizador de Elipses/Circunferências”.....</i>	70
5.4.1.1	O Algoritmo do “Localizador de Elipses”.....	70

5.4.2 Algoritmo Utilizado para a Análise.....	74
5.4.3 Erros de Conformidade.....	75
5.5 APLICAÇÃO PRÁTICA FINAL.....	75
5.6 CONCLUSÃO.....	77
<b>CAPÍTULO 6: PROPOSTAS DE DIRETRIZES PARA A AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....</b>	<b>78</b>
6.1 INTRODUÇÃO.....	78
6.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE UM PROCESSO DE MEDIÇÃO.....	79
6.2.1 Guia para Expressão da Incerteza de Medição - "ISO-GUM".....	81
6.3 PRINCIPAIS FONTES DE INCERTEZA DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO BASEADOS EM VISÃO.....	84
6.3.1 Diretrizes para Avaliação da Incerteza de um Sistema de Medição por Visão.....	84
6.4 CONCLUSÃO.....	86
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES.....</b>	<b>88</b>
<b>BIBLIOGRAFIA:.....</b>	<b>91</b>



# Índice de Figuras

FIGURA 1: CÂMERAS CCD .....	15
FIGURA 2: COMPONENTES DE UM SISTEMA DE VISÃO .....	15
FIGURA 3: SISTEMA DE VISÃO INTEGRADO À LINHA .....	15
FIGURA 4: BRONZINA COM REGIÃO DE INTERESSE MARCADA EM VERMELHO .....	24
FIGURA 5: RESULTADO DA APLICAÇÃO DE "LINE CHECK" EM OBJETO TUBULAR.....	25
FIGURA 6: DIREÇÕES DE PROCURA .....	26
FIGURA 7: ÁREA DE TRANSIÇÃO AMPLIADA COM REGIÃO DE INTERESSE EM DESTAQUE .....	29
FIGURA 8: VALORES DE NÍVEL DE CINZA DOS PIXEIS DA FIGURA 7 .....	29
FIGURA 9: COLUNAS DOS PIXEIS COM MAIOR GRADIENTE DE TRANSIÇÃO DE NÍVEL DE CINZA .....	29
FIGURA 10: ILUSTRAÇÃO DE UM "SUPERPIXEL" .....	30
FIGURA 11: ILUSTRAÇÃO DA OCUPAÇÃO DE UM SUPERPIXEL .....	31
FIGURA 12: AJUSTE CORRETO DA CORREÇÃO SUBPIXEL .....	32
FIGURA 13: PAINEL FRONTAL DO PROTÓTIPO "LINE CHECK" .....	33
FIGURA 14: BRONZINA COM REGIÕES DE INTERESSE DEFINIDAS .....	34
FIGURA 15: RESULTADOS DE UMA MEDIÇÃO UTILIZANDO-SE O "LINE CHECK" .....	35
FIGURA 16: LONAS DE FREIO COM REGIÕES DE INTERESSE MARCADAS .....	38
FIGURA 17: EFEITO DE BINARIZAÇÃO DE UMA IMAGEM.....	40
FIGURA 18: REFERÊNCIA FECHADA .....	41
FIGURA 19: OPERAÇÃO DE INVERSÃO APLICADA A UMA REGIÃO DE REFERÊNCIA .....	42
FIGURA 20: POSSÍVEL PROBLEMA DE BINARIZAÇÃO COM AJUSTE DE THRESHOLD EM "BLISTER" .....	42
FIGURA 21: PROCESSO DE BINARIZAÇÃO CORRIGIDO COM POSTERIOR PASSAGEM DO FILTRO IMPLEMENTADO .....	43
FIGURA 22: SUPORTE DE METAL COM SEU RASGO SENDO UTILIZADO COMO REFERÊNCIA .....	44
FIGURA 23: REFERÊNCIAS ABERTAS .....	44
FIGURA 24: REFERÊNCIA ABERTA EM UM PINO DE UM COMPRESSOR .....	45
FIGURA 25: PROBLEMA DA VARIAÇÃO DE ÁREA PARA REFERÊNCIAS ABERTAS .....	46
FIGURA 26: PARTES PRINCIPAIS DE UMA REGIÃO DE REFERÊNCIA FECHADA .....	47
FIGURA 27: FORMA LIVRE ENVOLVIDA POR UM RETÂNGULO GLOBAL .....	48
FIGURA 28: CASOS DE POSICIONAMENTO DE PONTOS DE REFERÊNCIA.....	49
FIGURA 29: LADOS A SEREM AJUSTADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE REGIÕES DE REFERÊNCIA.....	49
FIGURA 30: PAINEL FRONTAL DO MÓDULO DE AJUSTE DE PARÂMETROS DO PROTÓTIPO "LOCATE TOOL" .....	52
FIGURA 31: PAINEL FRONTAL DO MÓDULO DE EXECUÇÃO DO PROTÓTIPO "LOCATE TOOL" .....	54
FIGURA 32: PAINEL FRONTAL DO MÓDULO ANALISADOR DE LINHAS .....	60
FIGURA 33: REGIÃO DE BUSCA.....	62
FIGURA 34: SUBREGIÕES DE BUSCA.....	62

FIGURA 35. ESQUEMA DE PONTOS DOS RETÂNGULOS DE BUSCA .....	63
FIGURA 36: LADOS DO RETÂNGULO PARA VERIFICAÇÃO DE ERRO DE ANGULARIDADE.....	66
FIGURA 37: PAINEL FRONTAL DO MÓDULO ANALISADOR DE RETÂNGULOS (RETÂNGULO “PERFEITO”) .....	67
FIGURA 38: PAINEL FRONTAL AUXILIAR DO MÓDULO ANALISADOR DE RETÂNGULOS (SUPORTE).....	68
FIGURA 39: PAINEL FRONTAL DO MÓDULO ANALISADOR DE RETÂNGULOS (SUPORTE) .....	69
FIGURA 40. REGIÃO CIRCULAR DE BUSCA .....	70
FIGURA 41. ELIPSE GENÉRICA.....	71
FIGURA 42. RETAS DE LIGAÇÃO .....	72
FIGURA 43. RETAS COM VÁRIOS COEFICIENTES ANGULARES EM UMA MATRIZ DE PÍXIS .....	72
FIGURA 44. DESTAQUE DA BORDA A SER PROCURADA E DAS RETAS DE PROCURA.....	73
FIGURA 45: PAINEL FRONTAL DO MÓDULO ANALISADOR DE CIRCUNFERÊNCIAS E ELÍPSES .....	75
FIGURA 46: IMAGEM DE UM CIGARRO (VISTA SUPERIOR).....	76
FIGURA 47: FLUXOGRAMA DE AVALIAÇÃO E EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PELO "ISO-GUM" .....	82

# Capítulo 1: Introdução

## 1.1 Justificativa

O atual estágio de desenvolvimento tecnológico exige o aperfeiçoamento paralelo de técnicas de produção e controle de qualidade, de forma a garantir rapidez, flexibilidade de aplicação e confiabilidade do processo [ 3 ].

A inspeção e a medição são processos determinantes na garantia da qualidade de um produto. Para tal, elas podem estar inseridas durante o processo de fabricação ou no final. Elas têm como objetivo fornecer bases para ações sobre o produto ou de realimentação sobre o processo.

Em praticamente todos os ramos da engenharia, a utilização de sistemas automatizados de inspeção e medição vem crescendo de forma acelerada. Há, normalmente, vantagens operacionais e econômicas na utilização desses sistemas [ 3 ]. Grande parte dos sistemas de medição e inspeção são modulares e a automação facilita o compartilhamento desses módulos. Além disso, o aproveitamento do potencial de processamento incorporado pode realizar o gerenciamento completo de toda a instrumentação, bem como operações de controle estatístico e possibilitar a integração com sistemas supervisórios [ 3 ].

Na automação da inspeção e medição, a utilização de sistemas baseados em visão é algo bastante usual. O crescente avanço tecnológico permite o desenvolvimento de sistemas de visão cada vez mais sofisticados, com alta velocidade de processamento, confiáveis e com baixo custo de implantação e manutenção.

Dentro do contexto de sistemas automatizados de inspeção e medição baseados em visão, a empresa onde foi desenvolvido o presente trabalho é pioneira. É possuidora de tecnologia própria, com ênfase no desenvolvimento e integração de sistemas. As possibilidades de aplicação de conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial foram

extremamente grandes principalmente das áreas de manufatura, informática e metrologia.

## **1.2 Objetivo Geral**

O trabalho relatado neste documento teve por objetivo geral projetar e desenvolver protótipos de ferramentas auxiliares para o processo de inspeção e medição baseado em visão. Isso engloba o desenvolvimento de diversos métodos para uso genérico e específico. Esses protótipos estão inseridos em um contexto maior: o desenvolvimento de um software de inspeção e medição de alto desempenho. Esse software está voltado diretamente à aplicação em sistemas industriais de inspeção e medição por visão, o que implica integração com hardware, como câmeras, CLPs, placas de tratamento de imagens, entre outros.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- Projetar e desenvolver uma ferramenta com a função de detecção de pontos formadores de uma linha, denominada “Line Check”.
- Projetar e desenvolver uma ferramenta com a função de reposicionamento de regiões de interesse em uma imagem, denominada ‘Locate Tool’.
- Projetar e desenvolver uma ferramenta de análise morfológica de retas, retângulos, circunferências e elipses, denominada “Morphology Analysis”.
- Propor diretrizes de para a avaliação da incerteza de sistemas de medição

## **1.4 Metodologia**

Para a realização deste trabalho foi utilizado prototipação.

Motivos [ 5 ]:

- Melhorar os requisitos do sistema.
- Agilizar a análise de viabilidade de soluções aventadas.

Além disso, não havia a necessidade inicial de definição de requisitos rígidos de projeto, o que colaborou para a escolha desse método.

Como suporte ao desenvolvimento dos protótipos, foi utilizado a linguagem de programação LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) [ 7 ] em conjunto com sua biblioteca de suporte para sistemas de visão denominada IMAQ Vision [ 6 ].

Por se tratar de um poderoso e flexível ambiente de programação gráfica voltado para a instrumentação e análise, o LabVIEW em conjunto com o IMAQ Vision possui diversos recursos para o rápido desenvolvimento de ferramentas de análise de imagem. Isso possibilita que a implementação e o posterior teste sejam feitos em um curto intervalo de tempo e de forma bastante dinâmica.

A linguagem que o LabVIEW disponibiliza apresenta características gráficas (código “G”) que permite programação utilizando-se abordagem de diagrama de blocos, que é a notação natural de engenheiros e cientistas.

A linguagem escolhida para implementação do software geral, onde o contexto deste trabalho se insere, foi o Visual C++. Essa escolha foi feita baseada em requisitos de velocidade, desempenho e disponibilidade de corpo técnico. Em vista disso, a abordagem de diagrama de blocos se mostra bastante útil no processo de passagem da metodologia implementada em uma linguagem de desenvolvimento rápido para a sua versão final em Visual C++.

Quanto aos pré-requisitos para se operar o LabVIEW, pode-se dizer que são poucos, se limitando a algum conhecimento de sistema operacional, como também alguma experiência com algoritmos na forma de fluxogramas ou diagramas de blocos. Além disso, durante o curso, na oportunidade do estágio realizado na área de Automação da Medição, esse foi o sistema empregado, sendo caracterizado como estado da arte na área de desenvolvimento rápido de sistemas.

## **1.5 A Empresa**

Pollux é uma divisão do Grupo Hahntel do Brasil, localizada na cidade de Joinville, sendo especializada em sistemas industriais de visão.

Para obter sucesso neste campo, que envolve alta tecnologia, a Pollux investe muito.

Investe em seus profissionais, pessoas fascinadas por tecnologia e que dão tudo de si para gerar soluções inovadoras e de alta qualidade e em pesquisa e desenvolvimento, fundamentais para manter seus produtos no estado da arte na indústria de sistemas de visão, tendo relacionamento com fornecedores estratégicos, seja na indústria ou no meio acadêmico, no Brasil, Estados Unidos e Europa.

A Pollux busca continuamente o estabelecimento de parcerias fortes e duradouras. Estas parcerias convertem-se em ganhos substanciais de produtividade e qualidade para os clientes e produzem um ambiente motivador para ambas as partes.

## **1.6 Terminologia**

No desenvolvimento deste trabalho, a terminologia adotada foi proposta pela empresa. As ferramentas têm sua denominação original na língua inglesa por requisitos internos, padronização de comunicação entre desenvolvedores e devido ao software onde este trabalho está inserido estar sendo totalmente escrito em língua inglesa por motivos de exportação. Neste documento optou-se por conservar a nomenclatura recomendada. O termo inspeção está sendo utilizado neste documento quando se refere a verificações de atributos. A inspeção dimensional foi separada e tratada sob o termo medição.

## **1.7 Infra estrutura**

Toda a infra-estrutura necessária para a execução deste trabalho está disponível na empresa. São computadores, câmeras, conjuntos ópticos e de iluminação, além do software LabVIEW utilizado para o desenvolvimento dos protótipos. Desta forma pôde-se assegurar que o projeto era economicamente viável. O vínculo estabelecido entre este trabalho e a disciplina de Projeto de Fim de Curso, bem como com o orientador da empresa e da universidade, tornam o mesmo bem fundamentado no seu caráter técnico científico.

## **1.8 Estrutura da Monografia**

No capítulo 2 é feita uma revisão sobre os conceitos de sistemas industriais de visão, destacando de forma sucinta suas principais aplicações, bem como uma classificação das mesmas para cada tipo de indústria.

No capítulo 3 é apresentado detalhadamente o funcionamento do protótipo da ferramenta "Line Check", bem como o método utilizado para a obtenção de uma resolução subpixel de medição. Também são comentadas limitações de utilização, finalizando com uma aplicação prática completa utilizada na fase de validação do protótipo.

No capítulo 4 faz-se um estudo sobre o funcionamento do protótipo de localização de regiões de interesse denominado "Locate Tool". São apresentados os métodos de localização da imagem referência, as limitações e é apresentado uma aplicação prática final.

No capítulo 5, é apresentado o protótipo de análise de formas denominado "Morphology Analysis". Nele é feita uma descrição sobre o funcionamento de cada módulo que compõe o protótipo, explicando os métodos utilizados e terminando com uma aplicação prática para cada módulo.

No capítulo 6 são propostas algumas diretrizes para a avaliação da incerteza de sistemas de medição tomando como base o Guia para Expressão da Incerteza de Medição, o "ISO-GUM". Também são mostradas as principais fontes de incerteza incidentes sobre um sistema baseado em visão, seguidas de formas de avaliação.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho, o seu relacionamento com o curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial, e uma explanação pessoal sobre a importância da realização do projeto de fim de curso.

## **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Sistemas de Visão**

Sistemas industriais de visão são equipamentos automáticos que utilizam câmeras de vídeo para capturar imagens de produtos ou componentes. Essas imagens são rapidamente processadas e fornecem informações para que o sistema tome decisões e controle processos de fabricação ou outros equipamentos, tais como robôs e sistemas de controle de qualidade de produtos [ 23 ].

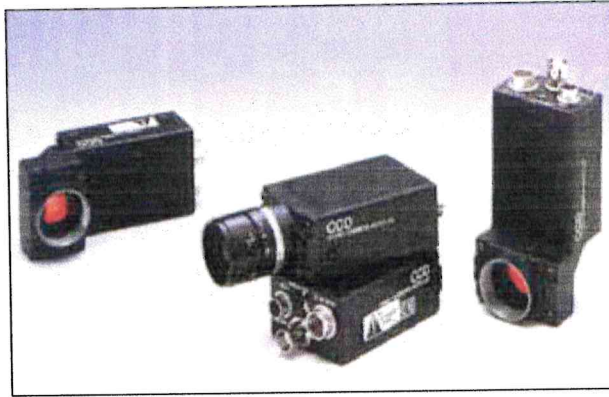
Os Sistemas de visão podem substituir o ser humano na grande maioria das inspeções ou verificações visuais. Eles ainda possibilitam inspeções nas quais os limites da visão humana são ultrapassados, tais como em processos de alta velocidade, ou que envolvam componentes complexos, ou de alta exatidão.

Os sistemas de visão podem concorrer com outras tecnologias e métodos, como máquinas de medir por coordenadas, métodos indutivos, entre outros.

### **2.2 Componentes de um Sistema de Visão**

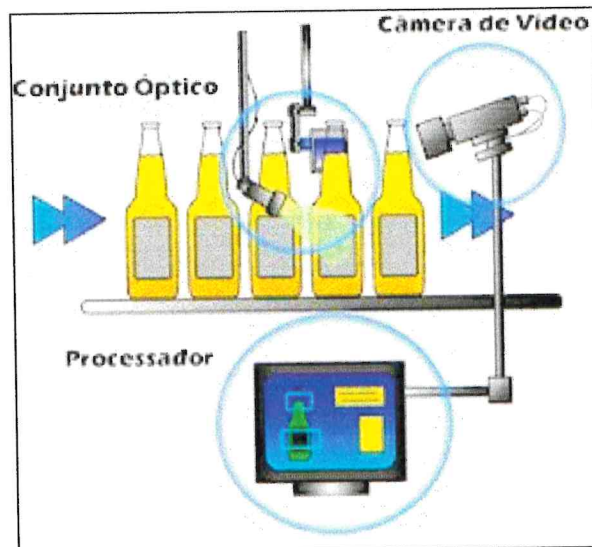
1. Câmeras de Vídeo: as câmeras de vídeo são responsáveis pela conversão das imagens em sinais elétricos que são compreendidos pelo sistema. Na maior parte das aplicações são utilizadas câmeras do tipo CCD, ideais para a maioria dos ambientes industriais. Em aplicações não convencionais são utilizadas câmeras especiais ou outros tipos de sensor que gerem sinais de vídeo compatíveis.
2. Conjunto óptico: o conjunto óptico é formado por fontes de luz, prismas, filtros e outros componentes ópticos que, em conjunto, são utilizados para enfatizar as características desejadas na cena. O resultado é a obtenção de imagens bem definidas, homogêneas e robustas às variações de luminosidade e de outras grandezas do meio ambiente;



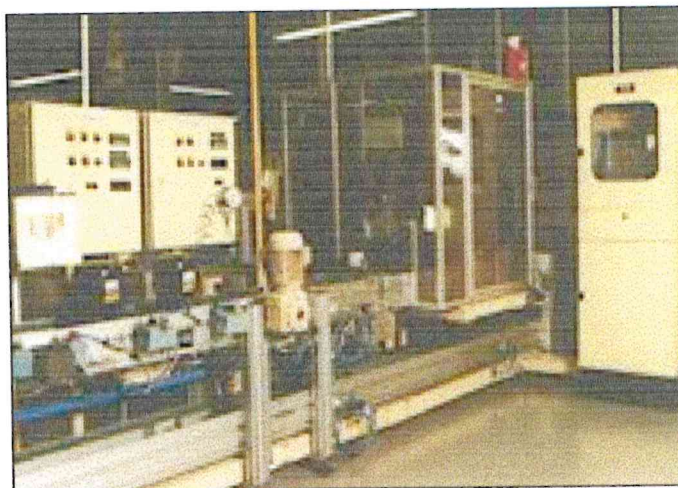


**Figura 1: Câmeras CCD**

3. Processador: o processador é responsável pela digitalização e análise das imagens capturadas pelas câmeras. Durante a análise, o processador obtém as informações necessárias e as utiliza de acordo com o tipo de aplicação.



**Figura 2: Componentes de um sistema de visão**



**Figura 3: Sistema de visão integrado à linha**

## **2.3 Tipos de Aplicações de Sistemas de Visão**

### **2.3.1 Garantia de Qualidade**

Sistemas de visão são intensamente utilizados para identificar e remover produtos defeituosos do processo de manufatura. A confiabilidade da inspeção e a capacidade de realizar inspeções rapidamente são as principais vantagens neste caso [ 23 ].

Ex. Rejeição de produtos com embalagem defeituosa e segregação de componentes com dimensões fora do padrão.

### **2.3.2 Seleção e Classificação**

Sistemas de visão são aplicados para selecionar e classificar produtos através de características observáveis como dimensão, coloração e formato.

Ex. Seleção de frutas por tamanho e cor.

### **2.3.3 Controle de Processo**

Sistemas de visão são utilizados como elementos sensores em controle de processos. As características do sistema de visão permitem que materiais a altas temperaturas ou de fácil deformação sejam continuamente monitorados, sem contato físico.

Ex. Fabricação de fibras ópticas e controle dimensional de laminação a quente.

### **2.3.4 Manipulação de Materiais**

Sistemas de visão são utilizados para localizar posições e características de objetos que estejam em movimento ou sendo manipulados. Isso é possível através da integração com robôs e mecanismos de movimentação.

Ex. Robôs retirando chocolates da esteira transportadora e colocando-os na embalagem.

### **2.3.5 Monitoração**

Sistemas de visão são utilizados para monitorar o funcionamento de máquinas, percebendo problemas e atuando antes que o equipamento seja danificado ou que um grande lote de peças defeituosas seja produzido.

Ex. Verificação da ausência de resíduos em moldes de injeção entre cada operação.

### **2.3.6 OCR (Optical Character Recognition) e Leitura de Código de Barras**

Sistemas de visão são empregados na leitura de código de barras e também no reconhecimento de caracteres impressos em produtos e embalagens ou apresentados em mostradores e vídeos.

Ex. Inspeção de rótulos de medicamentos e data de validade em produtos diversos.

## **2.4 Aplicações de Sistemas de Visão por Setor da Indústria**

### **2.4.1 Sistemas Industriais de Visão nas Indústrias Alimentícia e de Bebidas**

Poucas indústrias têm se beneficiado tão fortemente da aplicação de sistemas de visão quanto o segmento de alimentos e bebidas. Altamente difundido em plantas americanas e européias que atuam na área, sistemas de visão surgem como uma ótima possibilidade de redução de custo e melhoria da qualidade para as empresas produtoras de gêneros alimentícios.

O ambiente de fabricação típico encontrado na maioria destas indústrias oferece inúmeras oportunidades de aplicação para sistemas de visão. Da seleção e controle de qualidade das matérias-primas aos processos de fabricação e embalagem do produto, sistemas de visão podem atuar continuamente, sem intervenção humana, garantindo a conformidade de 100% da produção.

Através das imagens capturadas por câmeras de vídeo, o processador de um sistema de visão é capaz de orientar mecanismos para classificar frutas, legumes, ovos, ou qualquer tipo de gênero diferenciável por dimensão, formato ou coloração. Pode também ser aplicado para controlar sistemas que têm como função separar corpos estranhos em uma esteira transportando grãos.

Sistemas de visão podem ser utilizados para visualizar produtos como peças de carne sobre uma esteira transportadora, elaborar instantaneamente uma estratégia de corte e direcionar jatos de água para executarem a tarefa. A tecnologia de visão também tem sido amplamente utilizada para guiar robôs capazes de retirar produtos de uma esteira em movimento e colocá-los nas devidas embalagens.

Com o aumento contínuo da velocidade dos processos de embalagem, a aplicação de sistemas de visão vem se tornando indispensável. Utilizados para checar a integridade de 100% das embalagens, conferir níveis de envasamento e posicionamento de rótulos e etiquetas, sistemas de visão são também aplicados cada vez mais para realizarem leitura de caracteres e códigos de barras impressos nos produtos, garantindo que datas de validade e fabricação, códigos descritivos e informações fundamentais apresentem-se sempre corretos [ 23 ].

#### **2.4.1.1 Aplicações Mais Frequentes**

- Remoção de corpos estranhos em esteiras transportadoras.
- Orientação de robôs embaladores.
- Classificação e seleção de gêneros.
- Controle dimensional de produtos.
- Inspeção de embalagens, rótulos e tampas.
- Verificação do nível de envasamento.
- Leitura de códigos de barras e alfanuméricos.
- Controle de processos de fabricação.
- Detecção de defeitos em frutas.

## **2.4.2 Sistemas Industriais de Visão na Indústria Farmacêutica**

Para manterem-se competitivas no atual cenário de negócios, as companhias da indústria farmacêutica precisam adaptar-se continuamente para atender às novas demandas do mercado: aumento da capacidade produtiva, redução dos custos de produção, garantia de qualidade total (defeito zero) e atendimento de condições regulatórias, para mencionar apenas algumas. Dentre as mais novas tecnologias colocadas à disposição da indústria farmacêutica para vencer estes desafios, poucas têm se mostrado tão eficientes como a aplicação de sistemas industriais de visão.

Com o aumento contínuo da velocidade dos processos de embalagem, a aplicação de sistemas de visão vem se tornando indispensável. Utilizados para checar a integridade de 100% dos produtos e embalagens, conferir níveis de envasamento e posicionamento de rótulos, tampas e etiquetas, sistemas de visão são também aplicados para realizar leitura de caracteres e códigos impressos nos produtos, garantindo que datas de validade e fabricação, números de lotes e informações fundamentais apresentem-se sempre corretos e com a qualidade.

### **2.4.2.1 Aplicações Mais Frequentes**

- Verificação da presença e integridade de comprimidos em “blisters”.
- Verificação da qualidade de impressão em rótulos.
- Controle dimensional de produtos.
- Inspeção de embalagens e tampas.
- Verificação do nível de envasamento.
- OCR/OCV (datas de validade, números de lotes).
- Controle de processos de fabricação.
- Detecção de defeitos em frascos e caixas.

### **2.4.3 Sistemas Industriais de Visão na Indústria Metal-Mecânica**

O maior desafio dos fabricantes da indústria metal-mecânica nos tempos atuais tem sido o fornecimento de produtos com qualidade assegurada. Para não perder seus clientes e concorrer no mercado mundial, as empresas precisam reduzir drasticamente, muitas vezes a zero, o índice de componentes e produtos com defeito. Em uma grande quantidade de casos, a solução pode ser a implantação de um sistema industrial de visão.

Encontrada em grande parte das empresas americanas e europeias que atuam no setor metal-mecânico, a tecnologia de sistemas de visão experimentou na última década uma evolução acentuada. Esta evolução gerou sistemas de alta exatidão e baixo custo, capazes de substituir, com vantagens, o emprego de operadores em inspeções e verificações visuais. O sistema inspeciona 100% da produção e componentes com problemas são segregados no ato.

Por operar em altíssima velocidade, sistemas de visão são capazes de realizar inspeções complexas em frações de segundo, sem prejudicar os ciclos mais rápidos e sem qualquer contato físico. Em casos extremos, estes sistemas podem ser equipados para realizar dezenas de inspeções por segundo, como no caso da fabricação de rebites e tampas de garrafa.

Uma outra aplicação comum é a sua utilização para verificar a presença, disposição e distanciamento entre componentes de uma montagem. A análise dimensional completa de peças intrincadas pode ser realizada em poucos segundos. Em muitos ambientes de manufatura, sistemas de visão são encontrados realizando inspeções completas do produto acabado. Estas inspeções incluem a verificação da integridade de todas as partes, bem como a verificação de etiquetas e da embalagem. É possível também que o mesmo sistema faça a leitura de códigos impressos e verifique sua consistência.

As características dos sistemas de visão também permitem a realização de diversas outras atividades, como por exemplo, a inspeção de superfícies na busca de defeitos quase imperceptíveis, a seleção e a classificação automática de componentes através de atributos visíveis tais como formato e tamanho [ 23 ].

### **2.4.3.1 Aplicações Mais Frequentes**

- Controle dimensional de componentes.
- Inspeção de produtos acabados.
- Verificação de montagens.
- Inspeção de embalagens, rótulos e tampas.
- Identificação de rebarbas.
- Leitura de códigos de barras e alfanuméricos.
- Controle de processos de fabricação.
- Detecção de defeitos superficiais.
- Classificação e seleção por atributos visíveis.
- Visão para robôs e manipuladores.

### **2.4.4 Outros Setores**

Além dos setores já citados, os sistemas de visão tem sido utilizados amplamente na indústria. Abaixo estão listados as aplicações mais frequentes para cada setor.

#### **2.4.4.1 Indústria de Autopeças**

- Controle dimensional.
- Inspeção de embalagens, rótulos, etiquetas e tampas.
- Reconhecimento de caracteres e leitura de código de barras.
- Verificação da presença e disposição de componentes em montagens.
- Identificação de rebarbas.
- Classificação e seleção por tamanho, formato e cor.
- Contagem de partículas.
- Visão para robôs e manipuladores.

#### **2.4.4.2 Indústria de Plásticos e Borrachas**

- Controle dimensional.
- Inspeção de embalagens, rótulos, etiquetas e tampas.
- Reconhecimento de caracteres e leitura de código de barras.
- Verificação da presença e disposição de componentes em montagens.
- Identificação de rebarbas.
- Classificação e seleção por tamanho, formato e cor.
- Inspeção de seringas e descartáveis.
- Contagem de partículas.
- Inspeção de superfícies.

#### **2.4.4.3 Indústria de Higiene e Limpeza**

- Controle dimensional.
- Inspeção de embalagens, rótulos, etiquetas e tampas.
- Reconhecimento de caracteres e leitura de código de barras.
- Verificação do nível em envasamento.
- Classificação e seleção por tamanho, formato e cor.
- Contagem de partículas.

#### **2.4.4.4 Indústria Química**

- Inspeção de embalagens, rótulos, etiquetas e tampas.
- Reconhecimento de caracteres e leitura de código de barras.
- Verificação do nível em envasamento.
- Inspeção de “blisters” e cápsulas.
- Contagem de partículas.



## Capítulo 3: A Ferramenta “Line Check”

### 3.1 Introdução

Em inspeções em geral, o ente geométrico linha é uma presença constante. Diante desse quadro, surgiu a necessidade de se desenvolver uma ferramenta com a função de detectar os pontos (pixeis) delimitadores/formadores de uma linha.

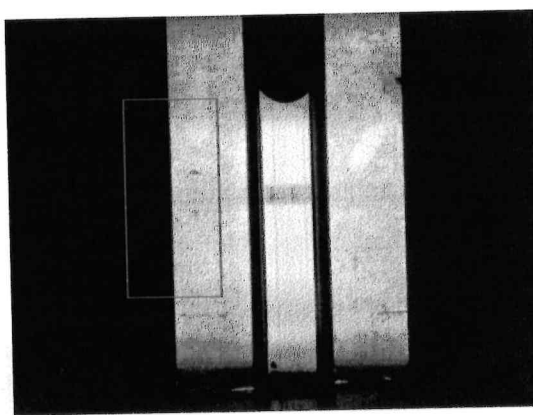
Em sistemas de visão, essa operação não trivial. Devido ao fato de se trabalhar com imagens, existe a possibilidade de as mesmas apresentarem problemas com relação à nitidez, ao contraste, entre outros. Em uma imagem formada por tons de cinza, uma linha é composta pela diferença de tonalidade entre pixeis vizinhos. Uma variação de preto para branco ou vice-versa, dificilmente acontece abruptamente (exceção nas imagens digitalizadas com apenas 2 níveis de cinza – branco e preto), ocorrendo em forma de gradiente, ou seja: uma transição que passa por níveis intermediários de cinza, até chegar ao branco ou preto. Em razão disso, existe a dificuldade de se definir um conjunto de pontos que delimite a divisão entre duas regiões contrastantes. Como as linhas são freqüentemente utilizadas como referências ou estão ligadas diretamente ou indiretamente a processos de medição, há a necessidade de que os pontos selecionados localizem o segmento de reta da forma mais exata possível. Nesse sentido, para possibilitar uma melhoria na determinação da posição da reta em estudo, optou-se pela utilização de uma técnica de subpixel. Essa técnica realiza uma interpolação objetivando a obtenção de frações de pixel, aumentando a resolução do sistema e conseqüentemente melhorando a localização do segmento de reta.

Neste capítulo é discutido, de forma detalhada, o funcionamento da ferramenta em questão. Também é apresentado o método utilizado para se alcançar a resolução subpixel, limitações de utilização e outros detalhes referentes à implementação da ferramenta como um todo. É finalizado o capítulo com a apresentação de uma aplicação prática completa realizada na fase de validação do protótipo.

### 3.2 Descrição da Ferramenta

A ferramenta “Line Check” foi desenvolvida para ser um localizador de pontos formadores de um segmento de reta contido no interior de uma região de interesse.

Uma região de interesse pode ser utilizada para focar o processamento e a análise em uma parte de uma imagem [ 6 ]. Ela pode ser traçada com contornos padrões (ovais, retangulares) ou contornos livres, dependendo da aplicação. Sua forma mais comum é a retangular.



**Figura 4: Bronzina com região de interesse marcada em vermelho**

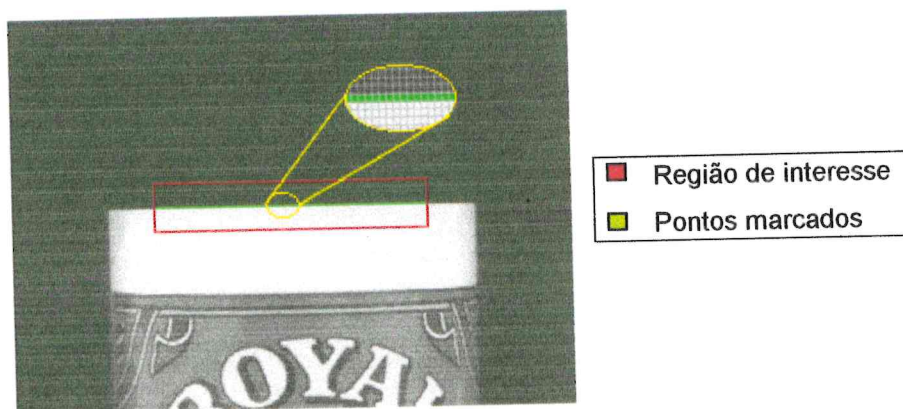
O “Line Check” é uma ferramenta básica para o desenvolvimento de outras funções mais sofisticadas de análise. Isso se deve ao fato do alvo dessa ferramenta ser a identificação da entidade geométrica segmento de reta, bastante comum em diversos casos de inspeção e medição.

Como em sistemas de visão o meio de análise é sempre uma imagem, as mais variadas geometrias podem ser transformadas em linhas, dependendo apenas da posição da câmera responsável pela aquisição [ 1 ]. Conforme pode ser visto na Figura 5, uma operação de “Line Check” foi executada em um recipiente tubular. Essa inspeção foi feita com a intenção de se verificar problemas de fabricação relativos ao fechamento hermético do frasco (verificação de possíveis dobras na borda do frasco). Nesse caso, uma circunferência está sendo vista sob a forma de uma linha.

O princípio de funcionamento do “Line Check” se dá pela detecção de um alto gradiente de transição no interior de uma região de interesse. Isso é possível graças ao fato de uma imagem ser, na verdade, uma matriz de pontos com valores que representam seu respectivo nível de cinza em uma escala de 0 a 255.

Dessa forma, a ferramenta faz uma verificação em todas as colunas do interior da região de interesse, percorrendo os pixels pertencentes a cada uma e fazendo uma comparação entre pixels consecutivos, obtendo assim a variação entre os mesmos. Com essa variação detectada, é possível saber entre qual par de pixels ocorreu a transição.

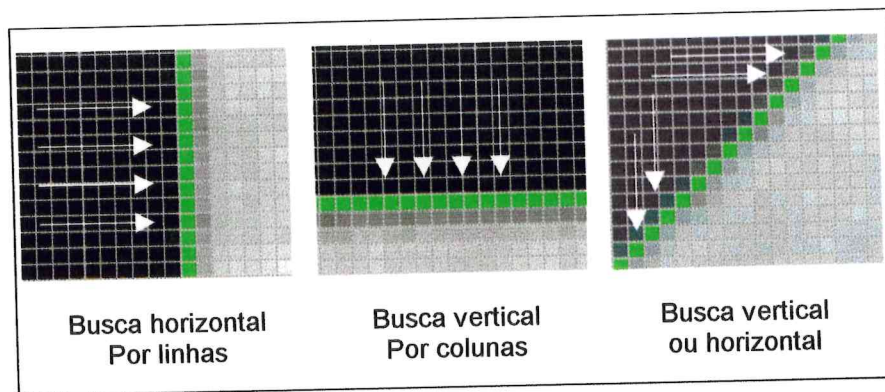
Executando esse procedimento ao longo de todas as colunas da região de interesse, é possível conhecer o perfil da linha contida na imagem em análise, conforme pode ser confirmado pelos pontos em verde ilustrados na Figura 5.



**Figura 5: Resultado da aplicação de “Line Check” em objeto tubular**

Como pode ser observado, o “Line Check” detectou os pixels que correspondem à faixa de transição de preto para branco. Isso ocorreu devido ao contraste que existe pela passagem de uma cor para outra. Vale ressaltar que para fins de representação, foram escolhidos os pixels externos de cada par.

Da mesma maneira que a busca é feita coluna a coluna, ou seja, o segmento de reta a ser procurado se encontra na direção horizontal (Figura 5), ela pode também ser feita linha a linha para o caso onde a direção do segmento a ser localizado é a vertical. Para o caso de linhas dispostas em diagonal, a direção de procura não é importante, conforme pode ser confirmado na Figura 6.



**Figura 6: Direções de procura**

### 3.3 Aplicações

Algumas das principais aplicações do “Line Check” são:

- medição de distância entre linhas paralelas: a correta definição dos pontos formadores de cada linha proporciona uma medição com melhor qualidade;
- utilização de linhas como referência: as linhas normalmente são utilizadas como referência para a medição de geometrias de uma mesma peça, o que justifica sua correta localização;
- as linhas podem ser utilizadas como referências para a localização de outras regiões de interesse.

Além dessas aplicações, a operação de “Line Check” define os pontos para uma posterior análise morfológica, possibilitando a detecção de diversos problemas relativos a fabricação e controle de qualidade. Isso pode ser obtido através do estabelecimento de rotinas de verificação de continuidade, linearidade, inclinação, entre outros.

### 3.4 Resolução Pixel e Subpixel

Quando se está interessado na realização de medições utilizando sistemas de visão, uma das maiores dificuldades encontradas está na exata localização de uma transição (preto para branco ou vice-versa) em uma imagem [ 1 ]. A grande maioria dos algoritmos descritos na literatura usualmente trabalham com a resolução óptica de um pixel [ 10 ]. Isso provoca uma certa inviabilização da

utilização desses sistemas para operações de medição onde se exigem tolerâncias muito apertadas como por exemplo na indústria metal-mecânica. Para minimizar esse problema e tornar a medição com sistemas ópticos mais aplicável a esses casos, surgiram diversos meios de se obter matematicamente uma resolução chamada de subpixel.

A resolução subpixel nada mais é que a adição de uma parte fracionária às coordenadas dos pixels constituintes da imagem, fazendo com que sejam representadas por números em ponto flutuante [ 10 ]. A utilização desse tipo de artifício pode levar à conclusão errônea de que a geometria da imagem foi modificada. Na verdade isso não ocorre, pois a resolução é um fator de limitação física da representação de uma imagem por meio digital, sendo obrigatoriamente feita no plano discreto. Portanto a resolução subpixel pode ser descrita como um método matemático que envolve interpolação como um meio de obtenção de melhores resultados, tendo como entrada valores discretos de uma imagem adquirida.

A utilização de métodos de subpixel tem a função de melhorar a qualidade dos resultados retornados pela localização dos pixels na imagem. Como a grande maioria dos sistemas industriais de visão tem a sua aplicação voltada para o chão de fábrica, a utilização de um método de medição de melhor qualidade requer diretamente um bom sistema de indexação de peças. Este deve garantir um posicionamento preciso, isento ou reduzido de vibrações, bem como iluminação e conjunto óptico de boa qualidade adaptado ao tipo de inspeção a ser feita.

Partindo-se então da premissa da utilização do sistema em escala industrial com inspeção em 100% das peças, deve-se prever uma alta frequência de amostragem. Isso faz com que o fator tempo de processamento seja de grande expressão no desenvolvimento de qualquer ferramenta de suporte. Ainda direcionado para a aplicação industrial, optou-se por desenvolver um método voltado diretamente para a medição de distâncias entre linhas verticais/horizontais posicionadas paralelamente. Esse é um dos casos mais comuns apresentados pela indústria e solúveis através da utilização do "Line Check" como ferramenta principal de inspeção.

Para a medição de distância entre retas paralelas, uma das maiores dificuldades a ser transposta por qualquer sistema é a definição de pontos de medição. Em sistemas de visão isso não é diferente. No caso da utilização de instrumentos convencionais como paquímetros, micrômetros, ou qualquer outro, o operador deve posicionar o mesmo em cada ponto definido, obtendo assim a leitura da dimensão correspondente, de forma localizada. No caso de sistemas de visão, não se escolhe diretamente um ponto, mais sim uma região de interesse que obrigatoriamente contém um ponto de medição adequado para aquela situação.

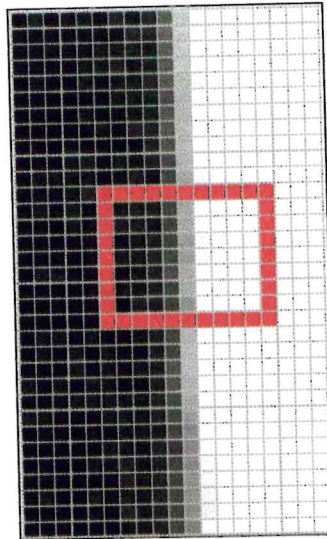
Similarmente aos sistemas convencionais, para que uma medição tenha um resultado mais confiável, é necessária a definição de diversos pontos, ou seja, diversas regiões de interesse. É em cada uma dessas regiões que o “Line Check” atua, de forma independente. A ferramenta localiza os pontos da reta contida em cada região e, já utilizando resolução subpixel, define as coordenadas de um ponto que melhor a represente. É na definição dessas coordenadas que se aplica o método desenvolvido conforme está descrito no item 3.4.1.

### **3.4.1 Método Desenvolvido para Obtenção da Resolução Subpixel**

A localização de um ponto no espaço discreto pode ser melhorada através da utilização de diversas técnicas que se resumem basicamente em interpolação. O método desenvolvido se vale desse mesmo artifício matemático.

O algoritmo desenvolvido apresenta os seguintes passos:

1. para que uma interpolação seja feita, é necessária a utilização de outros pontos auxiliares, de tal forma que uma média ou cálculo mais sofisticado seja feito. Então, seguindo esse princípio, primeiramente seleciona-se linha a linha os pares de pixel que apresentam o maior gradiente de transição de nível de cinza;
2. de posse dos respectivos níveis de cinza dos pares de pixel selecionados, se calcula uma média aritmética entre cada par de valores com o intuito de se ter uma primeira aproximação do valor médio de transição para cada par de pixel;



Área selecionada de uma transição de preto para branco. O retângulo em vermelho indica uma região de interesse. O valor dos pixels dessa região estão em destaque na tabela abaixo

**Figura 7: Área de transição ampliada com região de interesse em destaque**

3	11	7	12	43	146	255	255	255	255	255
7	11	16	14	38	136	255	255	255	255	255
2	12	15	9	37	139	255	255	255	255	255
2	4	9	15	40	132	251	255	255	255	255
3	7	8	19	43	128	247	255	255	255	255
8	3	9	15	44	135	255	255	255	255	255
1	6	9	17	42	138	255	255	255	255	255
6	4	15	12	37	123	255	255	255	255	255
5	3	13	13	37	145	255	255	255	255	255

**Figura 8: Valores de nível de cinza dos pixels da Figura 7**

5	6
5	6
5	6
5	6
5	6
5	6
5	6
5	6
5	6

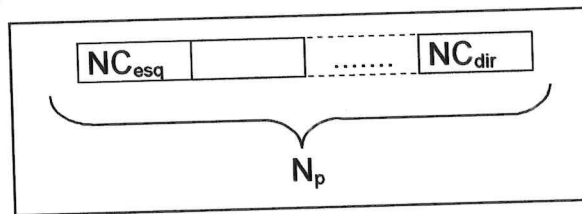
Nessa tabela está descrita a posição (coluna) dos pares de pixel com maior gradiente de transição de nível de cinza referente a cada linha da tabela anterior

**Figura 9: Colunas dos pixels com maior gradiente de transição de nível de cinza**

- admitindo, primeiramente, que a imagem tenha uma transição de preto para branco (conforme Figura 8), é necessário selecionar entre todos os pares provenientes do passo 1, um pixel com menor nível de cinza (coluna da esquerda) e um com maior nível de cinza (coluna da direita), obtendo em seguida sua respectiva localização (coluna). Caso a imagem tivesse transição do

branco para o preto, o caso seria invertido, ou seja, pixel com maior nível de cinza para a coluna da esquerda e menor para a coluna da direita;

4. com o par de pixel definido pelo passo 3, é possível a construção de uma estrutura aqui denominada "superpixel". É no interior dela que será realizada a interpolação e a posterior localização do ponto desejado. Para sua construção é necessário ter o número da coluna referente a cada pixel do par e o seu respectivo nível de cinza associado. Dessa forma, o superpixel será formado da seguinte maneira:



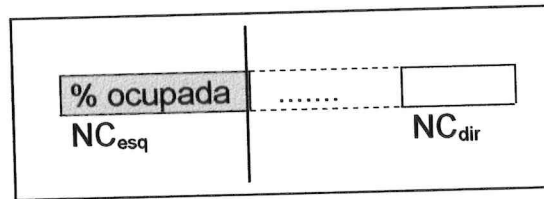
**Figura 10: Ilustração de um "superpixel"**

- Onde:  $NC_{dir}$ : Nível de cinza do pixel selecionado da coluna da direita;  
 $NC_{esq}$ : Nível de cinza do pixel selecionado da coluna da esquerda;  
 $N_p$ :  $N^{\circ}$  de pixels do superpixel =  $Abs(Ncol_{dir} - Ncol_{esq})$ ;  
 $Ncol_{dir}$ : número da coluna do pixel da direita;  
 $Ncol_{esq}$ : número da coluna do pixel da esquerda;

5. com a média de cada par, retornada pelo passo 2, calcula-se uma nova média, tendo-se assim um valor geral que pode ser considerado como um parâmetro que divide a imagem entre preto e branco. Tecnicamente esse é chamado de valor de "threshold". Se fôssemos digitalizar a imagem com somente dois níveis de cinza (a essa ação tecnicamente chamamos de binarização), esse seria o valor de transição, de tal forma que todos os pixels com nível de cinza acima desse valor seriam convertidos para branco (255) e os com valor abaixo, para preto (0);
6. com o valor de "threshold" já disponível, resta calcular a posição no interior do superpixel, que melhor corresponde à transição de preto para branco (ou vice-versa) da linha localizada no interior da região de interesse. Esse cálculo é feito em termos de porcentagem de ocupação e através de uma interpolação linear



simples, que leva em consideração os extremos do superpíxel e o valor de “threshold” encontrado no passo 5;



**Figura 11: Ilustração da ocupação de um superpíxel**

A relação que nos fornece a porcentagem de ocupação é dada pela seguinte equação:

$$(Eq. 1) \quad \% \text{ de ocupação do superpíxel} = \left| \frac{Th - NC_{esq}}{NC_{dir} - NC_{esq}} \right| \cdot 100$$

7. para finalizar, e tornar possível a utilização desse método como uma correção ao resultado retornado por uma medição utilizando resolução pixel, é necessário saber em qual pixel do interior do superpíxel se encontra a transição calculada, bem como seu percentual de ocupação. Para isso, basta aplicar as equações abaixo.

$$(Eq. 2) \quad \% \text{ por pixel} = \frac{100\%}{\text{tamanho do superpíxel (TS)}} \quad [\%]$$

$$(Eq. 3) \quad \text{Número do píxel de transição (NPT)} = \text{Trunc} \left( \frac{\% \text{ de ocupação do superpíxel (POS)}}{\% \text{ por pixel}} \right) + 1$$

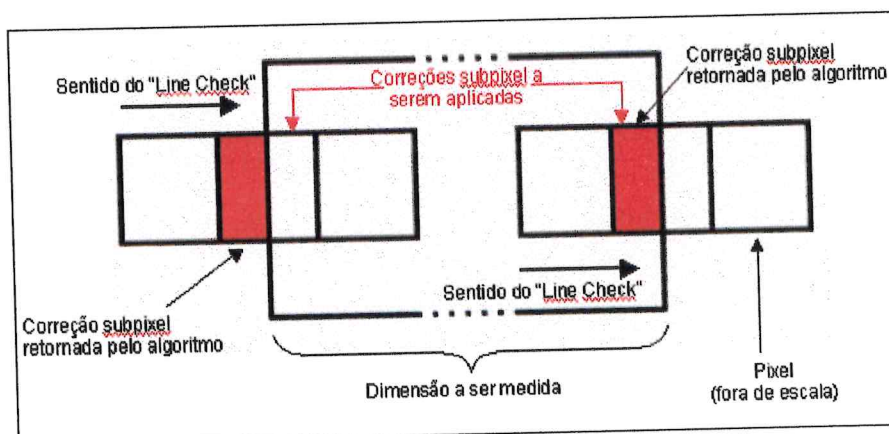
$$(Eq. 4) \quad \% \text{ de ocupação do píxel de transição} = \frac{\left( \left( POS - \left( (NPT - 1) \cdot \left( \frac{100}{TS} \right) \right) \right) \right) \cdot 100}{\frac{100}{TS}}$$

### 3.4.1.1 Observações

Esse algoritmo tem sua aplicabilidade tanto para linhas verticais como horizontais. Para o caso de linhas horizontais, a adaptação a ser feita é a substituição do termo linhas pelo termo colunas e vice-versa.

Vale ressaltar que o algoritmo termina com um resultado em frações de pixel, sendo que na maioria das vezes a saída desejada é em unidades de medição. Para que isso seja possível, é necessário entrar com a razão entre a dimensão de uma peça padrão pelo seu respectivo resultado de medição em pixels.

Ainda nesse sentido, vale lembrar que a ferramenta realiza a busca pixel a pixel sempre da esquerda para a direita nos casos de linha vertical e de cima para baixo nos casos de linha horizontal, por questões de simplicidade. Isso causa a necessidade de um ajuste baseado no sentido da medição, pois ora a correção deve ser incrementada, ora seu complemento deve ser incrementado. Como o subpixel tem função corretiva, o perfeito ajuste dessa compensação é primordial para o seu funcionamento. Esse ajuste é mostrado na Figura 12, a seguir:

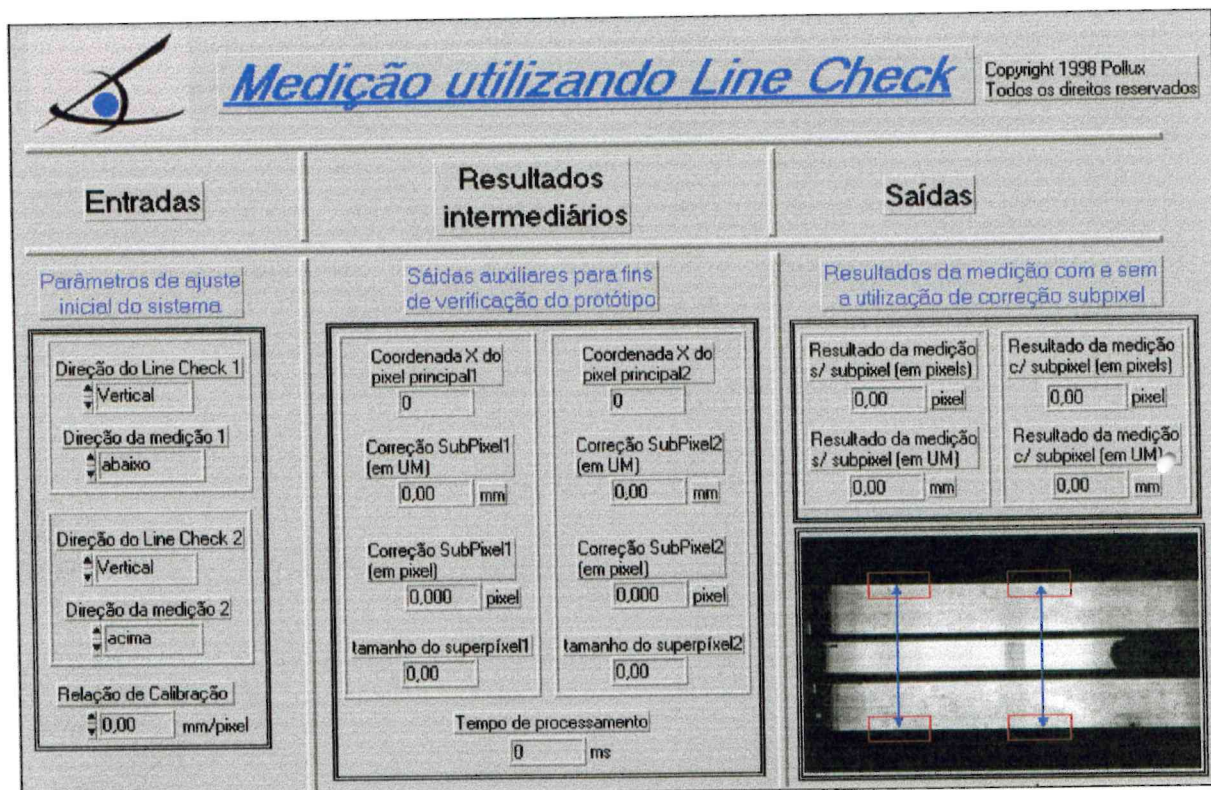


**Figura 12: Ajuste correto da correção subpixel**

## 3.5 Painel Frontal do Protótipo “Line Check”

Conforme o próprio título desse tópico enuncia, foi proposta inicialmente a construção de um protótipo. Além de testar a metodologia proposta, teve o intuito de melhorar o entendimento e determinar melhor os requisitos do problema em questão [ 5 ]. Em vista disso, a interface desenvolvida possui, além das entradas e saídas essenciais, outras que tem o papel de controle e verificação de resultados, de forma

a colaborar positivamente com o desenvolvimento da ferramenta em sua versão final.



**Figura 13: Painel frontal do protótipo "Line Check"**

A maioria dos controles e mostradores do painel são auto-explicativos, mas alguns merecem destaque:

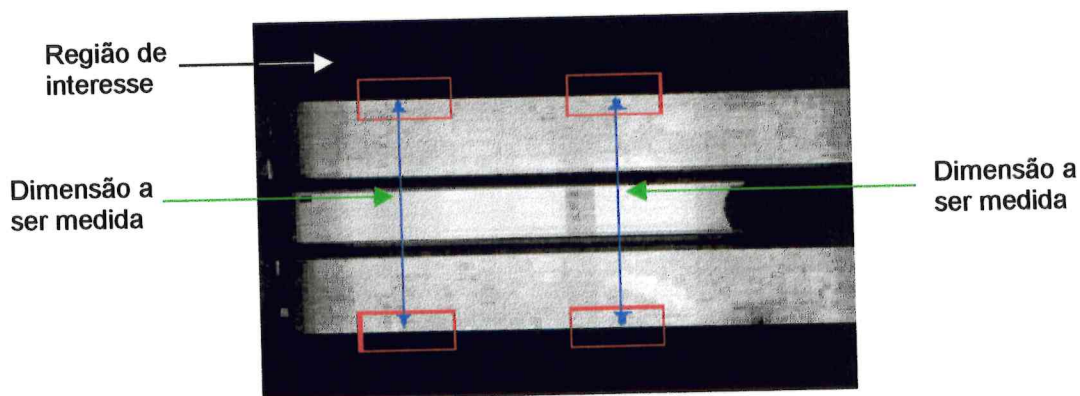
1. direção do Line Check: é uma entrada essencial para a ferramenta e informa ao algoritmo qual a direção da linha a ser medida (vertical/horizontal);
2. direção da medição: esse é o parâmetro que controla a correção subpixel. É ele que determina a adição correta do incremento conforme a Figura 12 propõe. Ele pode assumir 4 posições: à direita, à esquerda, acima e abaixo (referente à linha a ser analisada);
3. coordenada do pixel principal: valor da coordenada (coluna ou linha) do pixel onde ocorre a transição de preto para branco ou vice-versa;
4. resultado da medição: o protótipo apresenta os resultados da medição da imagem que aparece no painel (setas azuis indicam a dimensão a ser medida, retângulos vermelhos indicam regiões de interesse) tanto em unidades de medição como em pixels, com resolução pixel e subpixel;

5. tempo de processamento: parâmetro considerado de extrema importância durante todo o desenvolvimento do protótipo. Não poderia deixar de estar enfatizado no painel.

### 3.6 Aplicação Prática Final

Como forma de elucidar possíveis dúvidas referentes à utilidade e aplicação prática da ferramenta descrita ao longo deste capítulo, foi escolhida para exemplificação uma aplicação industrial realizada nas fases de validação do protótipo. Trata-se da medição de uma bronzina automotiva. Conforme citado em tópicos anteriores, o intuito da utilização de sistemas de visão se baseia na inspeção em linha de 100% das peças. Isso implica requisitos de indexação, visto que as mesmas devem passar pela estação de medição sujeitada “sempre” da mesma maneira, ou com pequenas variações ao longo de uma posição padrão ajustada.

A empresa que requisitou os testes garantiu um bom posicionamento das peças de forma que atendeu aos requisitos para que o sistema realize medições de qualidade e com boa repetitividade.



**Figura 14: Bronzina com regiões de interesse definidas**

Optou-se por medir a peça em dois pontos com a posterior retirada de uma média entre esses valores. O resultado da medição mostrado no painel expressa esse valor (em pixels e em unidades de medida). Na seção de resultados intermediários, é mostrado apenas a correção subpixel de dois pontos, mas internamente essa correção foi feita nos quatro pontos utilizados para a medição. O valor nominal da peça utilizada como padrão foi de 18,3 mm, sendo que não foram

fornecidas especificações de tolerância. Os resultados obtidos foram utilizados apenas como avaliadores qualitativos e de repetitividade do protótipo.

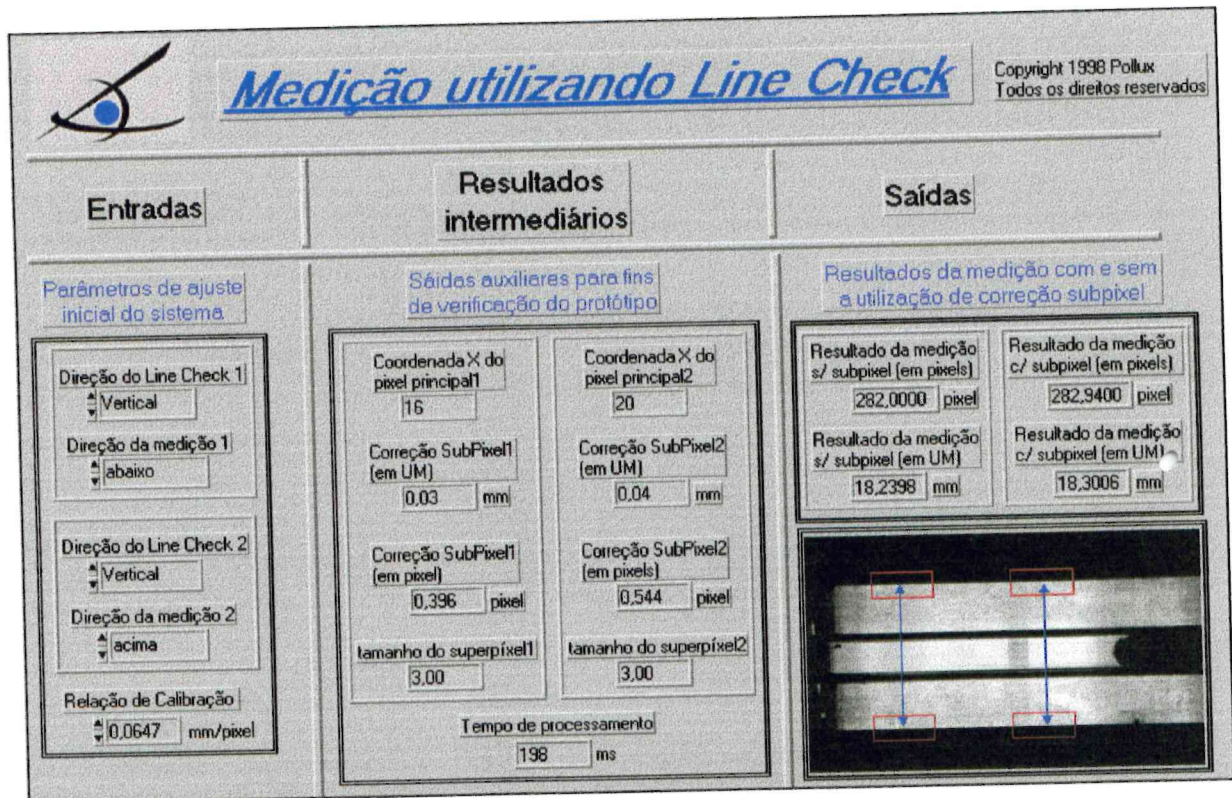


Figura 15: Resultados de uma medição utilizando-se o "Line Check"

### 3.7 Conclusão

Diante dos resultados apresentados na fase de validação do protótipo, o método utilizado para localização das linhas e posterior correção com resolução subpixel, atendeu os requisitos iniciais de melhoria de resultados e rapidez de processamento. Entretanto, a utilização da correção subpixel acarreta em um sistema mecânico de posicionamento de peças que em alguns processos pode se tornar inviável, seja por custo, ou por problemas de construção. Esse fator deve ser considerado como bastante crítico na decisão da utilização ou não de um sistema capaz de medir com essa resolução.

Para casos onde o tempo de execução não é crítico, melhores métodos para obtenção de resolução subpixel podem ser investigados. Em máquinas similares ao modelo VIEW [ 22 ], que não tem como requisito a colocação em linha, o fator

tempo pode ser desconsiderado por completo, o que permite ao projetista um maior investimento no cumprimento de requisitos metroológicos mais rigorosos.

Pelo fato do Visual C++ apresentar um desempenho superior ao LabVIEW, e a prática nos indicar que o tempo de processamento obtido no protótipo pode ser reduzido a 1/3 com a implementação em código C otimizado, conclui-se que a metodologia desenvolvida seja capaz de medir a uma frequência de aproximadamente 20 peças por segundo.

## Capítulo 4: A ferramenta “Locate Tool”

### 4.1 Introdução

Em sistemas de inspeção por visão, a correta localização das regiões de interesse é de extrema importância para o seu desempenho global. Essas regiões se concretizam como um meio através do qual é possível focar o processamento e/ou análise em uma determinada parte da imagem de uma peça sob inspeção.

Dessa forma, com o objetivo de assegurar um correto posicionamento dessas regiões de interesse, em sistemas onde a indexação das peças não é realizada de forma segura, foi necessário desenvolver uma ferramenta capaz de se ajustar aos pequenos desvios sofridos pelas peças em linha – normalmente em esteiras, paletes ou suportes – de tal forma a garantir que o objeto alvo da medição esteja totalmente inserido em sua respectiva região de interesse.

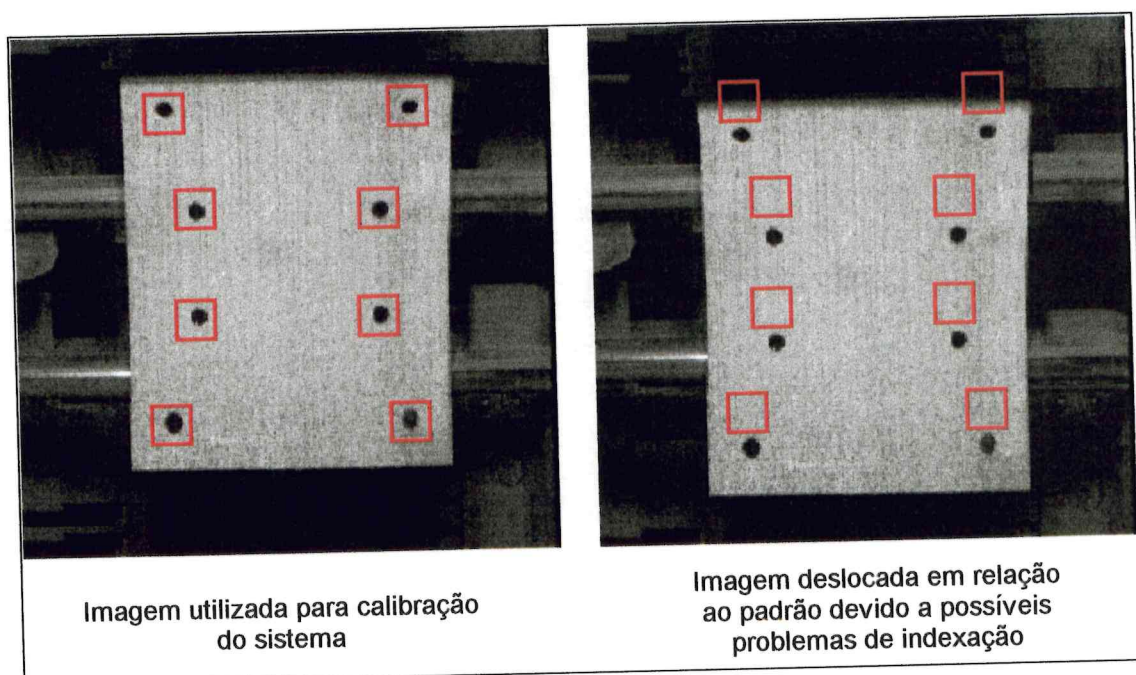
No desenvolvimento da ferramenta optou-se pela escolha de uma parte da imagem em questão a ser utilizada como referência para o reposicionamento das diversas regiões de interesse. Normalmente, escolhem-se furos, cantos, rasgos, ou outras formas para desempenhar esse papel. Partindo dessa premissa, o problema a ser resolvido passou a ser o da correta localização de um objeto/forma em uma imagem. Como complicador adicional, temos o compromisso da velocidade de processamento, que neste caso foi um requisito de influência decisiva na escolha dos métodos de localização da referência.

Neste capítulo é discutido de forma detalhada o funcionamento da ferramenta “Locate Tool”, com seus respectivos métodos de localização da imagem referência, limitações de utilização e detalhes de implementação da ferramenta como um todo. No final é apresentada uma aplicação prática completa realizada na fase de validação do protótipo desenvolvido.

## 4.2 Descrição da Ferramenta

A ferramenta "Locate Tool" foi desenvolvida com a intenção de reposicionar regiões de interesse em uma imagem. Devido à presença de pequenas variações de posição ocorridas por problemas de indexação em sistemas de transporte industriais, esse reposicionamento faz-se necessário em diversos casos práticos de utilização de sistemas de visão, seja para ações de inspeção ou de medição.

Para a realização desse reposicionamento, o caminho escolhido foi o da utilização de uma porção da imagem a ser analisada, como referência para a realocação das regiões de interesse. Isso foi possível através de um processo de ajuste de parâmetros, onde uma imagem padrão tem suas respectivas regiões de interesse e referência ajustadas.



**Figura 16: Lonas de freio com regiões de interesse marcadas**

Diante desse quadro, por motivos de organização e facilidade de operação, optou-se por dividir o protótipo desenvolvido em dois módulos:

1. Módulo de Calibração;
2. Módulo de Execução.



## 4.2.1 Módulo de Calibração

O formato mais comum para a seleção de regiões de interesse é o retangular (conforme Figura 16). Como a grande maioria dos problemas pode ser resolvido com essa geometria, o protótipo desenvolvido previu somente a utilização desse tipo de geometria. Com isso, seguindo o mesmo padrão utilizado para a localização de um pixel no espaço, as regiões de interesse têm seu posicionamento definido pela coordenada esquerda superior do retângulo que a delimita.

Para que o reposicionamento dessas regiões seja feito, é necessário que suas respectivas posições sejam fixas em relação à região de referência. Essa relação de dependência é que estabelece o mecanismo de funcionamento da ferramenta em questão.

Para que a região selecionada como referência seja capaz de atuar como tal, a correta definição de um ponto que a represente e localize na imagem total é fundamental. No caso deste protótipo em particular, optou-se pela utilização do centro de massa, que pode ser calculado facilmente através das expressões a seguir.

$$(Eq. 5) \quad CM_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot NC_i}{\sum_{i=1}^n NC_i}$$

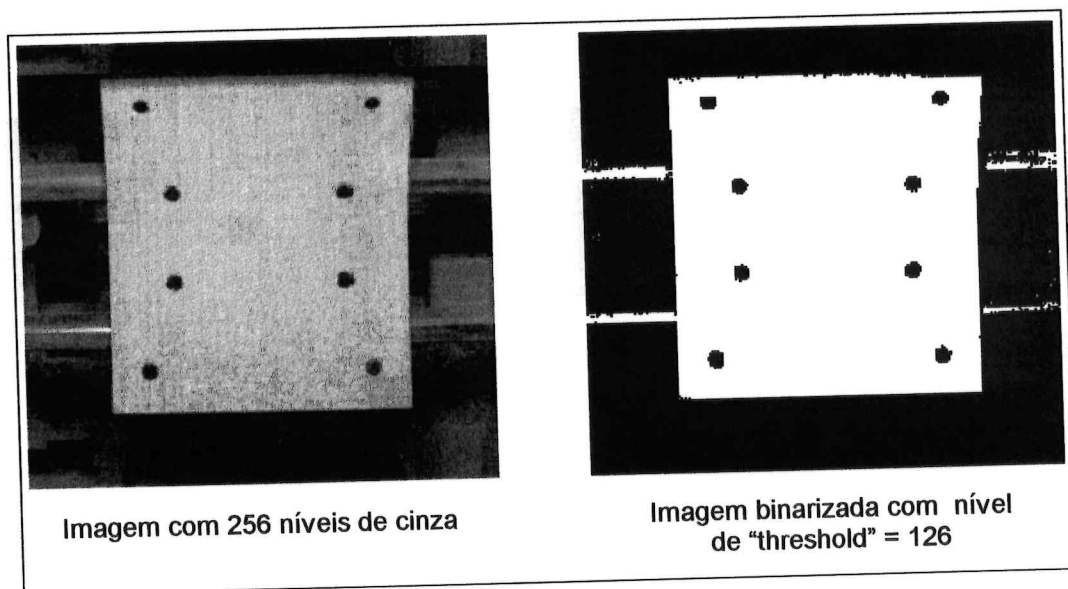
$$(Eq. 6) \quad CM_y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot NC_i}{\sum_{i=1}^n NC_i}$$

$$\text{onde: } \begin{cases} CM_x = \text{coordenada x do centro de massa} \\ CM_y = \text{coordenada y do centro de massa} \\ x_n = \text{coordenada x do pixel n} \\ y_n = \text{coordenada y do pixel n} \\ NC_n = \text{tom de cinza do pixel n} \end{cases}$$

Nas equações (Eq. 5) e (Eq. 6) nota-se que o nível de cinza associado a cada pixel é considerado no cálculo. Durante testes em laboratório, constatou-se uma certa variabilidade indesejável no resultado das coordenadas calculadas por essas expressões. Isso ocorreu devido a pequenas variações de iluminação do sistema, vibrações, entre outros. Como esses problemas são bastante comuns em ambiente industrial, e essa instabilidade nos resultados inviabilizaria a utilização da ferramenta, optou-se por uma solução mais robusta que leva em consideração a

imagem de referência já binarizada, ou seja, com somente dois níveis de cinza, 0 (preto) e 255 (branco). Essa adaptação, além de garantir uma maior repetitividade ao sistema, provocou uma simplificação do problema, facilitando o restante da implementação do protótipo.

A partir desse ponto do desenvolvimento, o problema a ser resolvido passou a ser o da binarização da imagem referência. Para contornar essa etapa, decidiu-se que pelo menos uma intervenção do usuário em termos de ajuste da faixa de binarização seria necessária. Esse ajuste nada mais é que a escolha de um nível de cinza específico que determina a divisão da imagem em preto ou branco. Por exemplo, se o nível de cinza escolhido for 126, a partir desse valor, todos os pixels com nível de cinza superior são convertidos para branco, e os inferiores para preto (Figura 17). A esse valor de transição escolhido (126), chamamos tecnicamente de nível de "threshold".



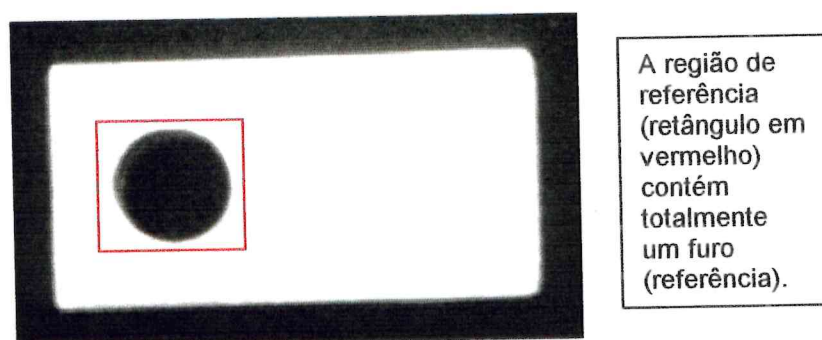
**Figura 17: Efeito de binarização de uma imagem**

A seleção da região a ser tomada como referência é de extrema importância para o desempenho do "Locate Tool". Para tal é comum a escolha de regiões que contenham formas que resultem em um bom contraste na imagem adquirida. Como pode ser observado na Figura 17, a imagem após ser binarizada ficou com seus furos em evidência, indicando uma condição de alto contraste. Essa é uma característica bastante desejável para uma região de referência. Similarmente aos furos, temos os rasgos, cantos, pinos, entre outros que provocam o mesmo efeito sob condições adequadas de iluminação.

O protótipo previu a utilização de formas abertas e fechadas para serem utilizadas como referência. Em decorrência disso, diferenças entre seus processos de calibração tiveram que ser definidas. Esses procedimentos serão tratados separadamente a seguir.

#### 4.2.1.1 Referências Fechadas

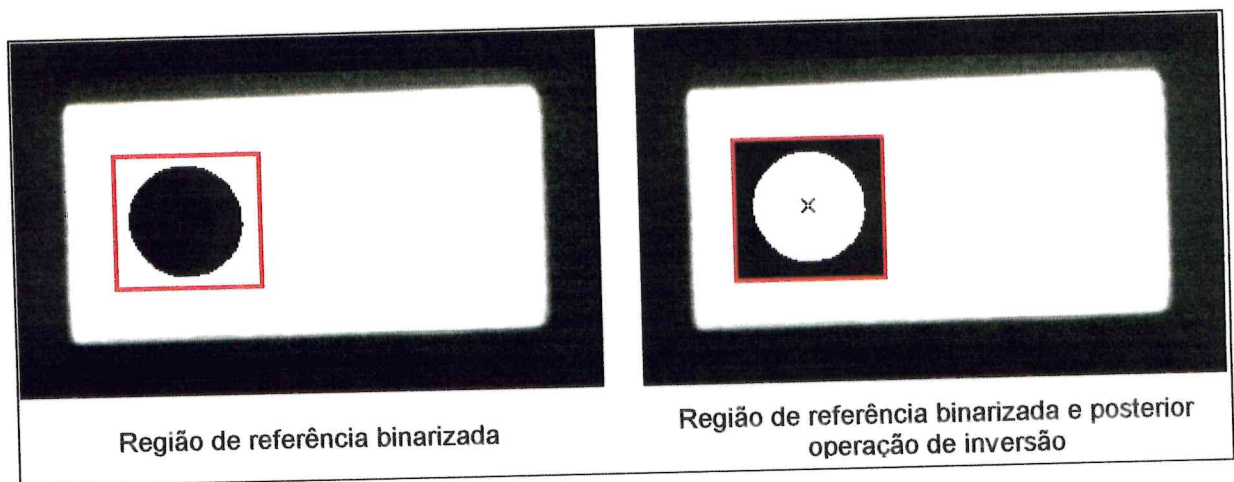
A princípio, uma referência que aqui denominamos fechada, pode ser definida como uma forma que está totalmente contida em uma região de referência escolhida.



**Figura 18: Referência fechada**

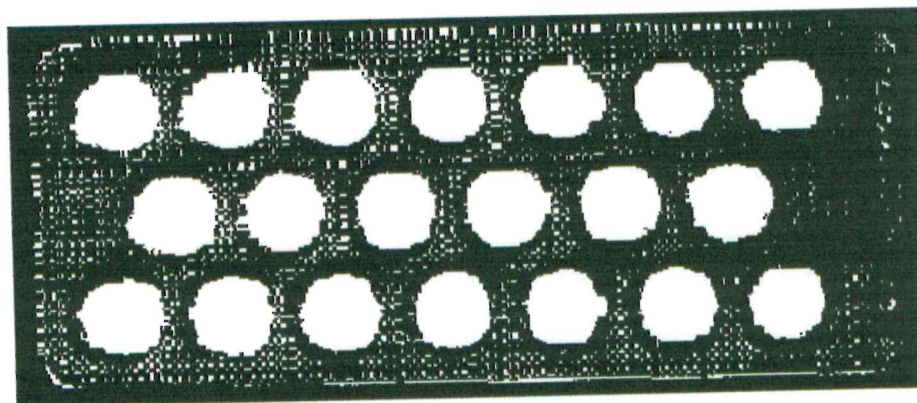
De acordo com as equações (Eq. 5) e (Eq. 6) mostradas anteriormente, o nível de cinza é levado em consideração no cálculo do centro de massa. Dessa forma, se com a aplicação da binarização conseguirmos deixar em branco (255) somente a geometria a ser tomada como referência, e o restante da região todo em preto (0), garantimos que o centro de massa calculado refletirá apenas a influência dos pixels constituintes da referência em questão. Assim, o centro de massa calculado será o da própria forma desejada como referência.

Se prestarmos atenção à região selecionada na Figura 18, notaremos que uma operação de binarização, a ela aplicada, irá gerar um resultado inverso ao que foi previsto anteriormente como necessário para o cálculo do centro de massa, pois ao invés da referência estar em branco, estará em preto. Para contornar essa situação, uma operação de inversão de imagem é requerida, e uma nova intervenção do usuário que está calibrando o sistema se torna necessária.



**Figura 19: Operação de inversão aplicada a uma região de referência**

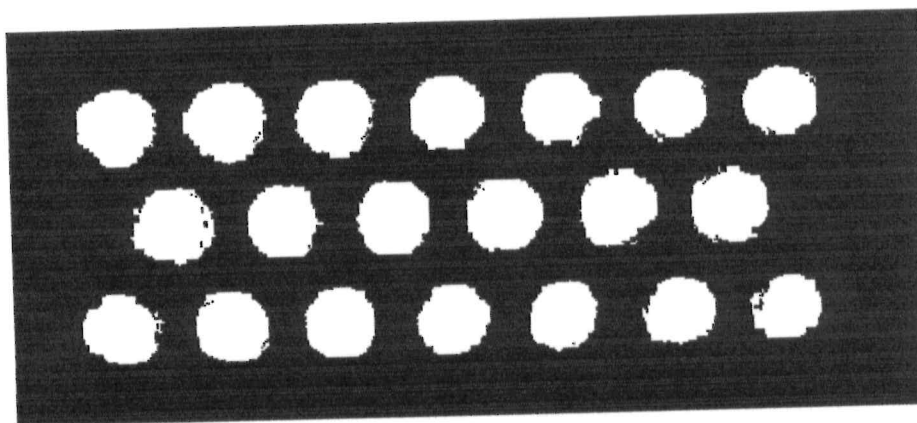
A binarização feita com um simples ajuste de nível de "threshold" nem sempre garante que toda a parte externa à forma tomada como referência seja preenchida totalmente por branco ou preto. Esse efeito está representado na Figura 20.



**Figura 20: Possível problema de binarização com ajuste de threshold em "blister"**

O ideal seria que todo processo de binarização apresentasse o resultado que pode ser visto na Figura 21, onde somente os objetos de interesse aparecem em branco, e o restante totalmente em preto. Em vista dessa afirmação, sentiu-se a necessidade da implementação de um filtro capaz de preencher com pixels pretos todos os pequenos pontos em branco localizados na imagem com ruído (Figura 20).

Supondo um caso hipotético representado pela Figura 20 e pela Figura 21, como uma aplicação prática, poderia-se escolher um dos comprimidos do "blister" para atuar como referência e reposicionar as regiões de interesse que porventura poderiam estar localizadas em cada comprimido.

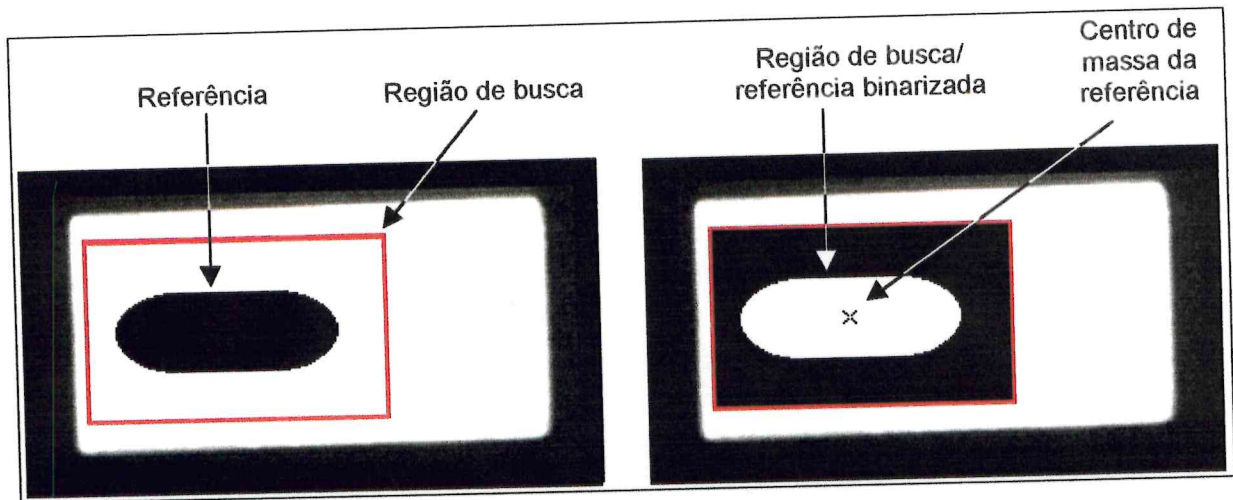


**Figura 21: Processo de binarização corrigido com posterior passagem do filtro implementado**

Como o objetivo da utilização dessa ferramenta está voltado para a linha de produção, o procedimento de funcionamento de todo o sistema se resume a uma comparação da posição da forma referência ajustada durante o processo de calibração, com a posição dessa mesma forma na imagem proveniente da linha de produção.

Diante disso, percebeu-se a necessidade da definição de uma região, que delimitasse uma faixa de variação de posição da peça em linha, em relação ao padrão calibrado. Essa região foi denominada região de busca. Verificou-se também que a já demarcada região de referência era capaz de executar esse papel. Portanto, a garantia de funcionamento do “Locate Tool” se restringe ao tamanho dessa área selecionada. Sempre que a referência da peça em linha estiver totalmente enquadrada pela região de busca – que nesse caso coincide com a região de referência do padrão – a ferramenta garante o reposicionamento das regiões de interesse na imagem adquirida da peça sob inspeção.

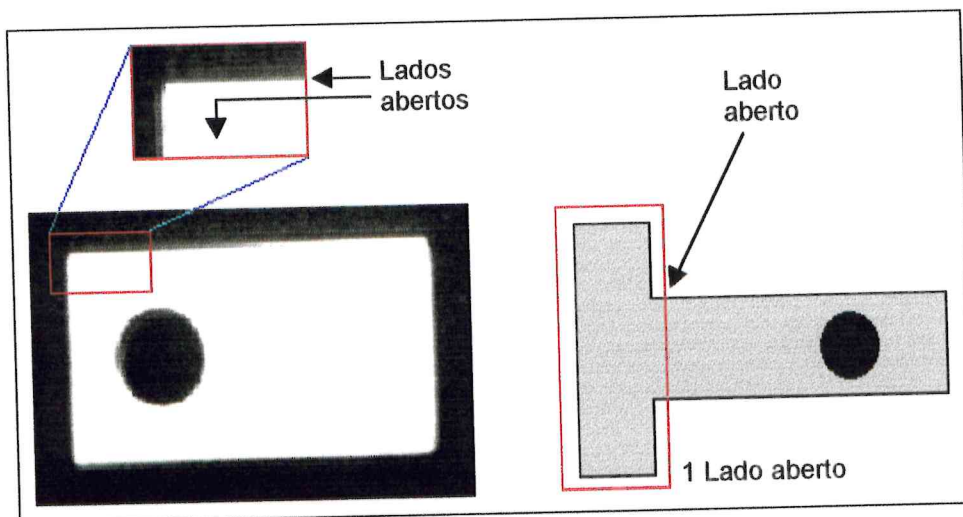
Vale ressaltar que essa conclusão leva em consideração o fato de que o conteúdo da região de referência estará binarizado, garantindo que o centro de massa seja calculado sempre levando em consideração apenas a forma adotada como referência.



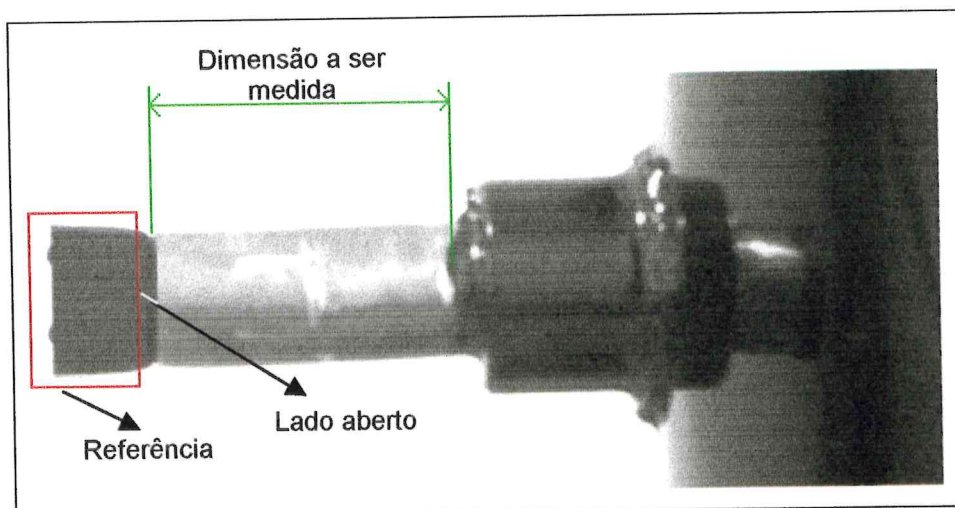
**Figura 22: Suporte de metal com seu rasgo sendo utilizado como referência**

#### 4.2.1.2 Referências Abertas

Inicialmente, é necessário afirmar que uma referência aqui definida como aberta, significa qualquer forma que não esteja totalmente contida na região de referência escolhida. Três exemplos básicos para clarificar esse conceito estão representados na Figura 23 e Figura 24 a seguir.



**Figura 23: Referências abertas**



**Figura 24: Referência aberta em um pino de um compressor**

Como pode ser observado, as possíveis regiões de referência escolhidas apresentam lados em aberto, ou seja, a forma contida no interior do retângulo delimitador apresenta uma certa continuidade que excede os lados do retângulo em vermelho.

A diferenciação entre referências abertas e fechadas se demonstrou útil, a partir do momento em que se definiu a necessidade do desenvolvimento de um método de procura da referência calibrada, na imagem adquirida de uma peça em linha. Diante disso, similarmente ao caso da referência fechada, também foi definido para referências abertas uma outra região denominada região de busca.

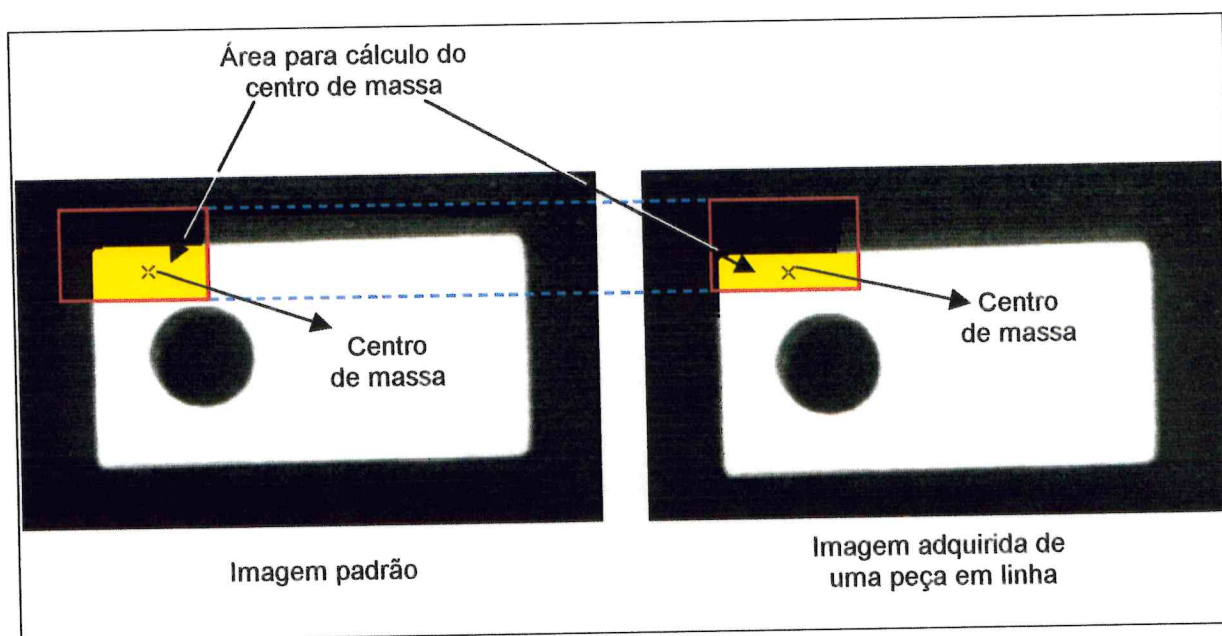
A situação de semelhança entre região de referência e região de busca, apresentado no caso das referências fechadas, não aconteceu para as abertas. Como o método escolhido para a localização de uma referência em uma imagem foi o cálculo do seu centro de massa, há a necessidade de que o mesmo seja calculado sempre sobre uma área fixa. Essa conclusão é obtida baseada no fato de que o centro de massa da referência do padrão, terá seu valor comparado com o centro de massa da referência da peça em linha. Para que essa comparação tenha efeito, a área de ambas as referências deve permanecer constante.

No caso da seleção de uma referência fechada, a condição de área constante é automaticamente obtida pela própria natureza da forma escolhida. No caso de um furo, por exemplo, desde que sua forma esteja totalmente contida no

retângulo de busca/referência, a área utilizada para o cálculo do seu centro de massa permanecerá constante (área interna ao furo conforme Figura 19).

Suponhamos agora que a forma escolhida fosse a de um “canto” de uma peça, conforme proposto pela imagem da esquerda na Figura 23. As pequenas variações de posição que podem ocorrer na indexação das peças em linha, fazem com que a área a ser utilizada para o cálculo do centro de massa (em branco) varie, inviabilizando uma comparação com o padrão calibrado.

Para facilitar o entendimento desse problema, na Figura 25 temos a representação de uma situação onde ocorre essa variação. Nessa figura, temos à esquerda o padrão que foi calibrado, e à direita a imagem de uma peça sendo inspecionada em linha. A região em amarelo representa a área utilizada para o cálculo do centro de massa. Note que o retângulo de busca (em vermelho) tem uma posição fixa e determinada pela imagem padrão (imagem da esquerda seguida de linhas pontilhadas em azul) e que área em amarelo varia consideravelmente com a mudança de posição.



**Figura 25: Problema da variação de área para referências abertas**

Para contornar essa situação, foi desenvolvida uma metodologia de posicionamento de uma região de referência de área fixa, baseada na posição da região de procura definida pelo usuário e na forma escolhida como referência (de forma similar ao caso das regiões fechadas). No entanto, necessitou-se estabelecer

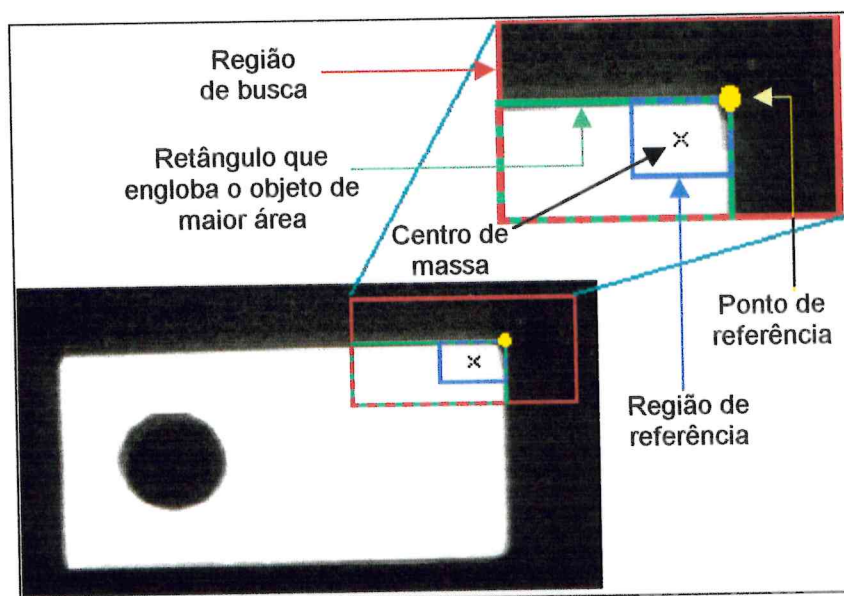


uma nova intervenção do usuário para a execução dessa tarefa, em virtude da necessidade de dimensionar essa área de referência em termos da dimensão do retângulo de busca.

Para que esse método pudesse ser implementado, novas estruturas tiveram que ser definidas. Algumas são simples extensões provenientes do caso para referências fechadas. Outras são estruturas auxiliares específicas para esse novo método.

Entre essas novas estruturas auxiliares, pode-se citar como principais o “retângulo que engloba a partícula de maior área”, bem como um ponto denominado “ponto de referência”.

A figura a seguir procura evidenciar essas regiões, bem como a respectiva nomenclatura que foi adotada.

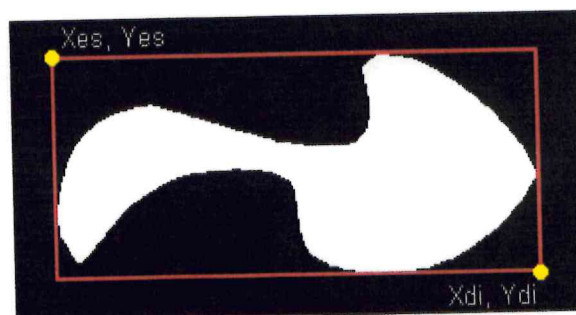


**Figura 26: Partes principais de uma região de referência fechada**

Fazendo um paralelo com o caso em que se tem uma referência fechada, o centro de massa seria calculado diretamente sob a porção em branco do retângulo de busca. Conforme dito anteriormente, não se pode considerar essa região como adequada para a realização desse cálculo. Entretanto, se definíssemos uma outra região menor que a porção inicial em branco, e com seu tamanho definido de forma fixa e atrelado ao posicionamento de um ponto que obrigatoriamente pertencesse ao retângulo que engloba a região em branco inicial, o nosso problema estaria

resolvido. Os passos desenvolvidos para execução desse procedimento são os seguintes:

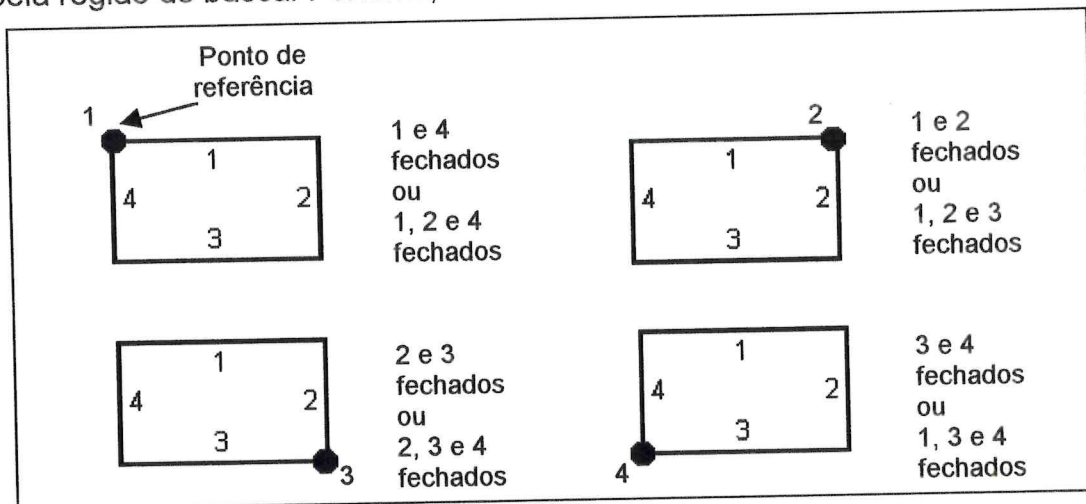
1. primeiramente, necessita-se saber quais lados da referência escolhida são abertos (conforme Figura 23). Para tal procede-se uma varredura sobre os pixels pertencentes à borda do retângulo de busca, verificando sempre se houve uma troca de nível de cinza de 0 (preto) para 255 (branco) ou vice-versa. Esse processo é realizado lado a lado individualmente, de forma que a ocorrência de uma mudança não indique somente que a referência é aberta, mas sim quais lados o são;
2. após, inicia-se um processo de detecção da porção em branco da imagem englobada pelo retângulo de busca – a imagem no interior desse retângulo já se encontra binarizada dos mesmos modos que a Figura 21. Essa detecção se resume à obtenção das coordenadas  $(X_{es}, Y_{es})$  e  $(X_{di}, Y_{di})$  formadoras de um retângulo que envolve totalmente a parte branca. A esse retângulo, chamamos tecnicamente de retângulo global;



**Figura 27: Forma livre envolvida por um retângulo global**

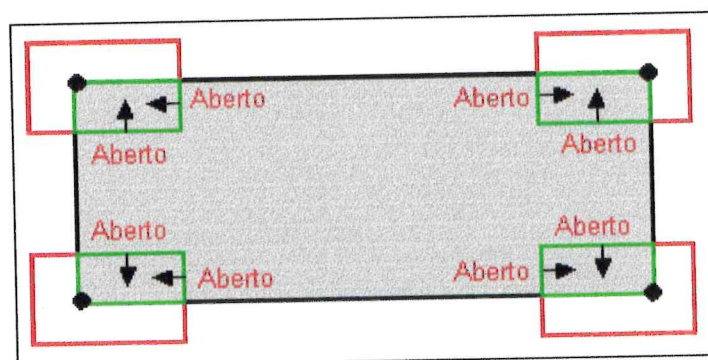
3. com as coordenadas do retângulo global obtidas pelo passo anterior e a informação proveniente do passo 1, pode-se proceder com a definição do ponto de referência. Esse ponto tem a função de ser a base para o dimensionamento da região de referência. É a partir dele que será determinada a diagonal que define o retângulo delimitador da região de referência. Para tal, de forma a garantir o funcionamento do algoritmo, esse ponto foi atrelado ao retângulo global vindo do passo 2 (retângulo que envolve a porção branca da imagem). Essa medida foi necessária para garantir a mobilidade dessa referência com a variação de posição das peças na imagem proveniente da linha. Para tanto, a informação sobre qual lado está aberto é fundamental, pois a localização do

ponto de referência foi estabelecida na junção de dois lados fechados, visto que essa posição pode ser sempre achada, desde que respeitado os limites impostos pela região de busca. Portanto, os casos se resumem em quatro (Figura 28):



**Figura 28: Casos de posicionamento de pontos de referência**

Após a obtenção das informações realizadas pelos três passos do algoritmo anterior, o sistema está pronto para receber os dados provenientes do usuário com relação ao ajuste dos lados do retângulo que delimita a região de referência. Os lados a serem modificados são apenas os que são abertos, ou seja, os lados que não determinaram o ponto de referência. Após esse ajuste, é calculado o comprimento de cada lado, e disponibilizado para o módulo de execução. É importante ressaltar, que para dois lados fechados, têm-se outros dois ajustáveis. Para três lados fechados, apenas um ajustável.



**Figura 29: Lados a serem ajustados para o dimensionamento de regiões de referência**

Reportando-se novamente à Figura 26, pode-se verificar a região de referência representada em azul, no interior da região de busca.

O módulo de calibração termina a sua contribuição para o “Locate Tool” disponibilizando todos os dados aqui definidos a partir de um arquivo com a seguinte configuração:

1. coordenadas da região de busca ( $X_{es}$ ,  $Y_{es}$ ,  $X_{di}$ ,  $Y_{di}$ );
2. coordenadas do centro de massa da região de referência ( $X_{cm}$ ,  $Y_{cm}$ );
3. “flag” de inversão de imagem (1- inverte / 0- normal);
4. nível de “threshold”;
5. “flag” indicador do tipo de referência (1- aberta / 0-fechada);
6. índice do ponto de referência (1,2,3 ou 4);
7. tamanho dos lados do retângulo de referência ajustado pelo usuário.

#### **4.2.2 Módulo de Execução**

Esse módulo utiliza todos os dados gerados pelo módulo de calibração para por em execução a ferramenta “Locate Tool” na linha de produção.

O funcionamento desse protótipo é baseado na comparação entre as coordenadas do centro de massa do padrão e da peça sendo inspecionada. Diante disso, o módulo de execução utiliza os dados advindos da calibração para condicionar as imagens provenientes da linha de produção e fazer a comparação entre os centros de massa. Sendo assim, os dados são utilizados na seguinte seqüência:

1. coordenadas do retângulo de busca. Esse dado é de extrema importância, visto que delimita o espaço no qual a ferramenta consegue compensar possíveis desvios de posicionamento;
2. nível de “threshold”. É com essa informação que a imagem no interior da região de busca será binarizada, deixando em branco apenas a forma de referência;
3. “flag” de inversão de imagem. Dependendo das propriedades de uma imagem adquirida, o processo de binarização gera um resultado com características inversas ao desejado, conforme exemplificado na Figura 19. Esse “flag” indica se a operação de inversão foi necessária ou não para o processamento da imagem

calibrada, visto que esse procedimento irá se estender para as imagens provenientes da linha de produção;

4. “flag” indicador do tipo de referência. Esse “flag” informa ao módulo de execução o tipo de referência que está sendo tratado. Isso é necessário porque os procedimentos para o cálculo do centro de massa são diferenciados para cada tipo, sendo portanto utilizadas rotinas diferentes em cada caso;
5. índice do ponto de referência. É utilizado somente no caso de referências abertas. Esse índice é responsável pelo correto ajuste da área de cálculo do centro de massa, seguindo a regra estipulada pela Figura 28. Ele atua como base para o correto dimensionamento da região de referência, pois se configura como um dos extremos da diagonal do retângulo que circunda essa região;
6. tamanho dos lados do retângulo de referência ajustado pelo usuário. Esses dados são fundamentais para o ajuste da região de referência. Sua utilização se dá em conjunto com o ponto de referência, visto que o retângulo a ser definido vai ser resultado da soma (ou subtração) desses valores com suas coordenadas;
7. coordenadas do centro de massa da região de referência. Após a definição da região de busca, da região de referência, e da preparação da imagem, o módulo de execução vai calcular o centro de massa da região de referência da peça em linha, e compará-lo com as coordenadas fornecidas pelo módulo de calibração. Após isso, com o conhecimento prévio das coordenadas de cada região de interesse, é possível reposicioná-las baseando-se na diferença entre o valor do centro de massa calculado e o fornecido pela calibração.

### **4.3 Aplicações**

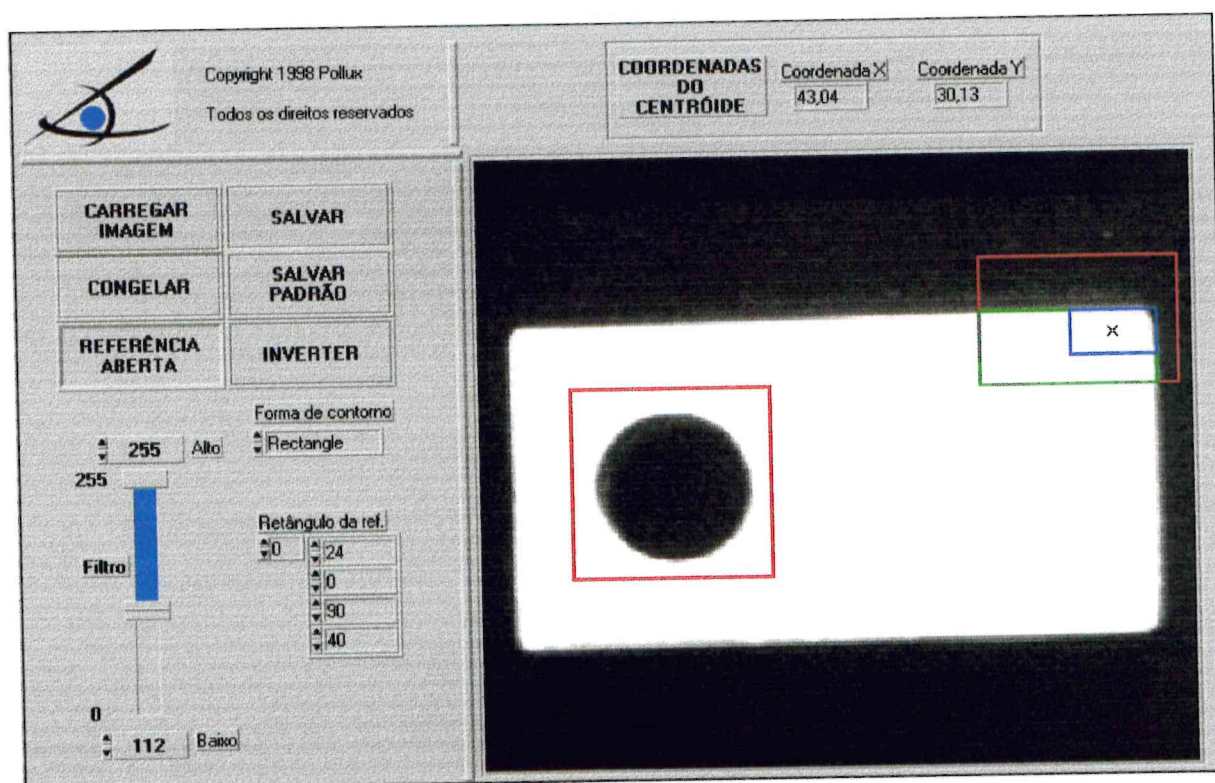
O “Locate Tool” é uma ferramenta que tem papel acessório nos sistemas industriais de visão. Como as regiões de interesse são sempre utilizadas em qualquer aplicação, a utilidade do “Locate Tool” se torna bastante grande. No entanto, sua utilização deve se restringir aos casos onde o posicionamento das peças em linha seja realmente considerado como um problema para a inspeção, visto que essa ferramenta acarreta em um acréscimo de tempo no processamento de cada inspeção.

## 4.4 Aplicação Prática Final

Como forma de minimizar possíveis dúvidas referentes à utilidade, implementação e aplicação prática da ferramenta descrita ao longo desse capítulo, foi escolhido para exemplificação uma aplicação utilizada na fase de validação do protótipo. Trata-se do reposicionamento de uma região de interesse destinada à medição do furo de um suporte. Para a realização dessa medição, foi preciso posicionar a região de interesse de forma a englobar totalmente o furo. Para tal, utilizou-se como referência o canto direito da peça.

Conforme pode ser observado, a referência escolhida foi do tipo aberta com 2 lados fechados, se enquadrando no caso 2 da Figura 28.

Os painéis frontais que são mostrados indicam somente as características do protótipo em si, não apresentando os resultados provenientes do processo de medição, visto que não é o objeto principal deste módulo.



**Figura 30: Painel frontal do módulo de ajuste de parâmetros do protótipo "Locate Tool"**

Inicialmente, foi realizada a etapa de calibração do sistema, onde foi ajustado o nível de "threshold", o tamanho da região de referência, a região de busca, entre outros.

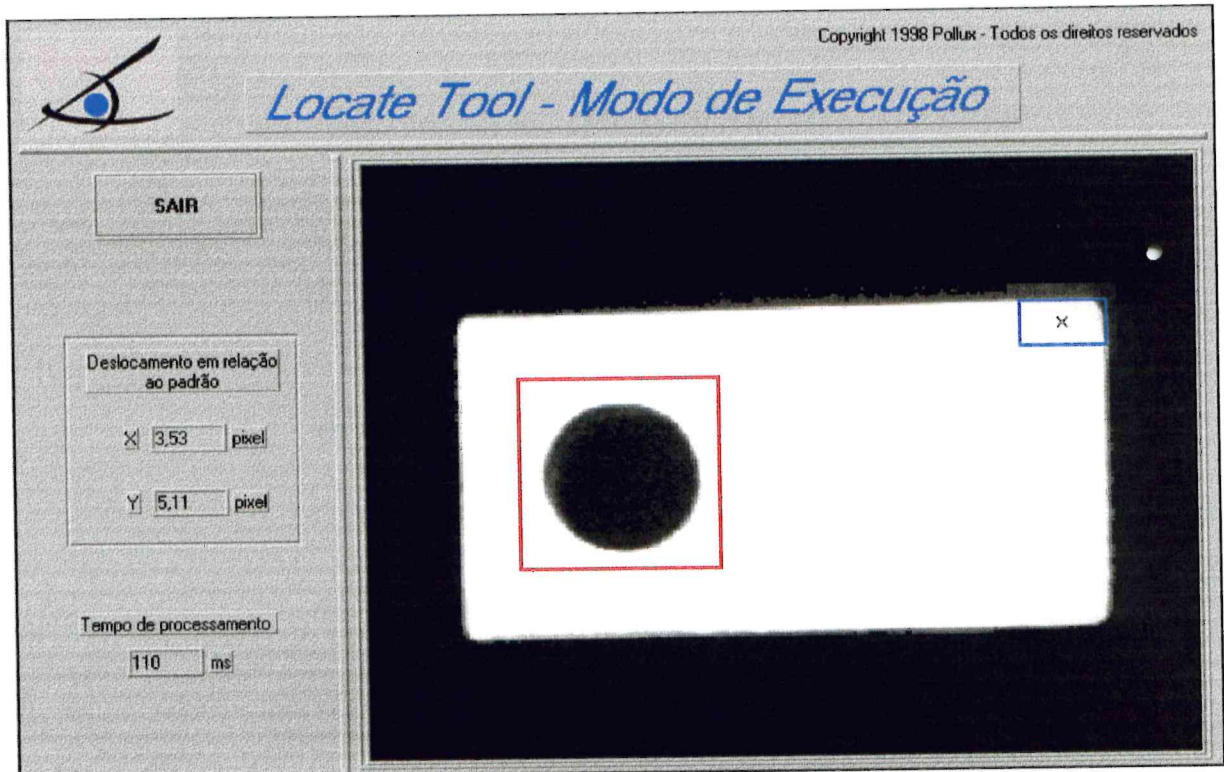
A maioria dos controles e mostradores do painel deste módulo são auto-explicativos, sendo que alguns merecem um certo destaque:

1. botão Carregar imagem: esse botão é utilizado para situações onde o processo de calibração vai ser feito sobre um arquivo de imagem previamente salvo;
2. botão Congelar/Ao Vivo: esse botão apresenta duas posições distintas:
  - a. Ao Vivo: essa é a posição padrão de início do protótipo. Sempre que é iniciada uma nova sessão de calibração, a ferramenta espera por uma imagem proveniente da câmera, ao vivo;
  - b. Congelar: quando esse botão é pressionado, a imagem da tela (anteriormente em Ao vivo) fica congelada, possibilitando que a mesma seja arquivada para ser utilizada posteriormente para um processo de calibração;
3. botão Referência Aberta/Fechada: como o processo de calibração é diferenciado para cada tipo de referência, é através desse botão que informamos ao protótipo o tipo de região a ser calibrada;
4. Salvar: utiliza-se esse botão para salvar uma imagem previamente congelada;
5. Salvar Padrão: depois de terminado o processo de calibração, é necessário disponibilizar os dados para o módulo de execução. Esse botão é responsável pelo armazenamento em um arquivo texto de todos os parâmetros provenientes do processo de calibração;
6. Inverter: esse botão quando pressionado realiza uma operação de inversão da imagem contida no interior da região de busca.
7. Retângulo da Referência: esse controle só está disponível quando o protótipo está trabalhando com referências abertas. Ele permite o ajuste dos lados do retângulo que vão delimitar a região de referência;
8. Coordenadas do Centróide: esses indicadores mostram o valor das coordenadas de centro de massa da forma referência sendo ajustada.

Após isso, foi necessário disponibilizar os dados para o módulo de execução. Isso foi feito através do armazenamento de todos os parâmetros de calibração em

um arquivo. Para executar essa operação, pressionou-se a tecla "salvar padrão", completando o processo de ajuste de parâmetros.

Após esse processo, o próximo passo a ser seguido é o da importação do arquivo gerado pela calibração pelo módulo de execução (procedimento interno do protótipo) e posterior colocação em funcionamento na linha de produção.



**Figura 31: Painel frontal do módulo de execução do protótipo "Locate Tool"**

Como pode ser visto, o painel desse módulo foi desenvolvido de forma a ter seu funcionamento totalmente automatizado, necessitando apenas dos parâmetros do módulo de calibração. Esse módulo possui apenas 2 mostradores: um que dá a diferença entre as coordenadas do padrão e as coordenadas da peça sendo inspecionada e outro que fornece o tempo de processamento para cada reposicionamento realizado. No exemplo, nota-se os valores  $X=3,53$  e  $Y=5,11$ . Isso significa que a imagem em inspeção está deslocada 3,53 pixels para baixo e 5,11 pixels à direita em relação à calibração.



## 4.5 Conclusão e Discussão sobre Otimização do Protótipo

Devido à complexidade do problema a ser resolvido pelo “Locate Tool”, durante sua implementação surgiram alguns pontos que podem ser otimizados.

Como um item a ser discutido, pode-se citar o fato da utilização de um parâmetro de referência diferente do centro de massa.

Um parâmetro que acelera todo o processo e acaba com a diferenciação entre referências abertas e fechadas, é a utilização de um dos pontos localizados nos 4 cantos de um retângulo, que engloba a maior partícula localizada no interior de uma região de busca. Dessa forma, não há mais distinção entre os tipos de referência, tornando desnecessária a definição (no caso de referências abertas) de uma nova região de referência, pois apenas a garantia de que a região de busca engloba a forma referência já é suficiente para que uma ferramenta que localize a maior partícula realize toda a operação.

Uma outra possível otimização, esta de mais fácil implementação, é a utilização, no caso de referências abertas, do próprio ponto de referência como parâmetro de referência. Isso propicia um ganho de tempo de processamento, devido ao fato da não realização da operação de cálculo do centro de massa, bem como a eliminação da etapa de ajuste do retângulo de referência no módulo de calibração.

Um outro ponto onde a ferramenta pode ser melhorada, encontra-se no fato do usuário ter que ajustar manualmente o nível de “threshold” para a operação de binarização da imagem. É interessante que esse parâmetro seja definido automaticamente, de forma a minimizar erros de calibração. Outro ponto que pode ser automatizado é a inversão da imagem depois de binarizada, economizando ao usuário mais essa preocupação durante o “setup” da ferramenta.

Uma limitação do protótipo a ser resolvida, é o fato do mesmo ser capaz de ajustar as regiões de interesse apenas em deslocamentos em X e Y isolados e não em casos de rotação. Como na grande maioria dos casos industriais esse tipo de desvio não se apresenta com frequência, nessa primeira versão optou-se por

desconsiderar essa hipótese. No entanto, para as próximas versões esse caso deve ser incluído na análise.

Em casos bastante específicos, pode-se projetar o funcionamento do “Locate Tool” para a seleção de regiões de interesse de diferentes geometrias, sejam elas circulares, elípticas, formas livres, entre outras. Para tal é necessário repensar todas as técnicas de localização utilizadas nesse protótipo.

Com relação ao modo como foi implementado o protótipo, o objetivo de ser fazer dois módulos distintos está ligado diretamente ao fato da praticidade. O módulo de calibração realiza operações estritamente ligadas ao “setup” da ferramenta, antes dela ser colocada em funcionamento na linha de produção. Como pode ser necessário a repetição desse procedimento principalmente nas fases iniciais de funcionamento de um sistema, foi prevista a realização dessa operação apenas com imagens das peças, propiciando ganho de tempo e economia, visto que não seria necessário deslocar uma pessoa à empresa cliente apenas para realizar uma recalibração. Também pode ser ressaltado que, como todo o protótipo foi desenvolvido voltado para a aplicação em chão de fábrica, o módulo de execução foi desenvolvido de forma a ser o mais enxuto e autônomo possível, sem a possibilidade de permitir, de forma direta, a alteração acidental de qualquer parâmetro.

No desenvolvimento desse protótipo, o tempo de execução foi sempre considerado como fator crítico. Como pode ser visto na Figura 31, o tempo de processamento alcançado por essa ferramenta foi da ordem de 100 ms. Entretanto, ela é considerada como um acessório para operações de inspeção e medição, causando sempre um processamento adicional. Além disso, o processamento é diretamente ligado ao tamanho da região de busca, portando de grande variabilidade. Dessa forma, sua utilização fica restrita a casos onde realmente ela é necessária e esse acréscimo de processamento não compromete a velocidade de inspeção.

# Capítulo 5: A ferramenta “Morphology Analysis”

## 5.1 Introdução

Em sistemas de inspeção e medição em geral, a grande incidência de formas geométricas bem conhecidas como retas, retângulos e circunferências, determinou o desenvolvimento de ferramentas específicas de análise. Em sistemas de visão isso não é diferente.

Diante disso, surgiu a necessidade de se desenvolver um protótipo que realizasse uma análise a nível morfológico e geométrico dessas formas. Com esse propósito foi desenvolvido o “Morphology Analysis”, um conjunto composto por três módulos independentes capazes de realizar diversas operações de medição e verificação:

1. Analisador de Linhas – Morphology Line;
2. Analisador de Retângulos – Morphology Rectangle;
3. Analisador de Circunferências e Elipses – Morphology Circle.

Nesse capítulo é descrito detalhadamente o funcionamento de cada módulo, com seus respectivos métodos de medição, verificação e aplicabilidade, e finalizando com uma aplicação prática de cada módulo.

## 5.2 Analisador de linhas – “Morphology Line”

O objetivo deste módulo é fazer uma análise morfológica de linhas formadas por pontos previamente selecionados pela passagem de uma ferramenta do tipo “Line Check”. Essa análise consiste na obtenção dos seguintes dados:

- ajuste da melhor reta utilizando o método dos mínimos quadrados;
- cálculo do erro de ajuste (erro de linearidade);
- inclinação (em graus);
- comprimento da reta.

## 5.2.1 Algoritmos Utilizados para a Análise

Os algoritmos utilizados neste módulo são bastante simples, visto que se baseiam na análise de um ente fundamental da geometria analítica: a reta. Diante disso, foi utilizado como base para obtenção da maioria dos dados o método dos mínimos quadrados e teoremas da geometria analítica básica.

### 5.2.1.1 Ajuste da Melhor Reta e Cálculo do Erro de Linearidade

Para o ajuste da melhor reta, foi utilizado o método dos mínimos quadrados. Esse método está descrito abaixo:

Forma geral da equação da reta:  $P(x) = a_0 + a_1 x$

Problema: Determinar  $a_0$  e  $a_1$

$$\begin{cases} P_0 = S_0 \cdot a_0 + S_1 \cdot a_1 \\ P_1 = S_1 \cdot a_0 + S_2 \cdot a_1 \end{cases} \quad \text{onde:} \quad \begin{cases} S_0 = n \\ S_1 = \sum_{i=1}^n x_i \\ S_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{cases} \quad \text{e} \quad \begin{cases} P_0 = \sum_{i=1}^n y_i \\ P_1 = \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i \end{cases}$$

Efetuando-se algumas substituições, chegou-se às seguintes equações para o cálculo dos coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  e do erro de ajuste:

$$(Eq. 7) \quad a_0 = \frac{P_0 - S_1 \cdot a_1}{S_0}$$

$$(Eq. 8) \quad a_1 = \frac{S_0 \cdot P_1 - S_1 \cdot P_0}{S_2 \cdot S_0 - S_1^2}$$

$$(Eq. 9) \quad a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot a_1}{n}$$

$$(Eq. 10) \quad a_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_i) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot n - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$(Eq. 11) \quad \text{Erro} = \frac{1}{n} \cdot \sum (f_i - y_i)^2$$

Onde:  $x_i$  = coordenada X  
 $n$  = nº de pontos

$y_i$  = coordenada Y  
 $f_i$  = coordenada Y ajustada

A aplicação do método anterior foi testada com pontos formadores de “semi-retas” provenientes do módulo “Line Check”. Notou-se que para retas com inclinação próxima de 90 graus (“Line Check” no sentido horizontal) o algoritmo não apresentava um bom resultado. Esse fato é aceitável em vista de que para essas inclinações os pontos não se configuram como uma função – há mais de um elemento do domínio com a mesma imagem. Para corrigir essa deficiência, optou-se por rotacionar os conjuntos de pontos que apresentam esse problema em 90 graus e processá-los como se fizessem parte de uma “semi-reta” mais próxima da direção vertical. Esse procedimento garante que os pontos irão sempre caracterizar uma função, contribuindo para a convergência do método.

### **5.2.1.2 Inclinação**

Da expressão da melhor reta obtém-se o valor da inclinação através da retirada do seu respectivo coeficiente angular ( $a_1$  – termo em X). Esse valor corresponde à tangente do ângulo de inclinação. Como a unidade mais clara e de fácil interpretação é o grau sendo medido no sentido trigonométrico, algumas operações de conversão foram necessárias.

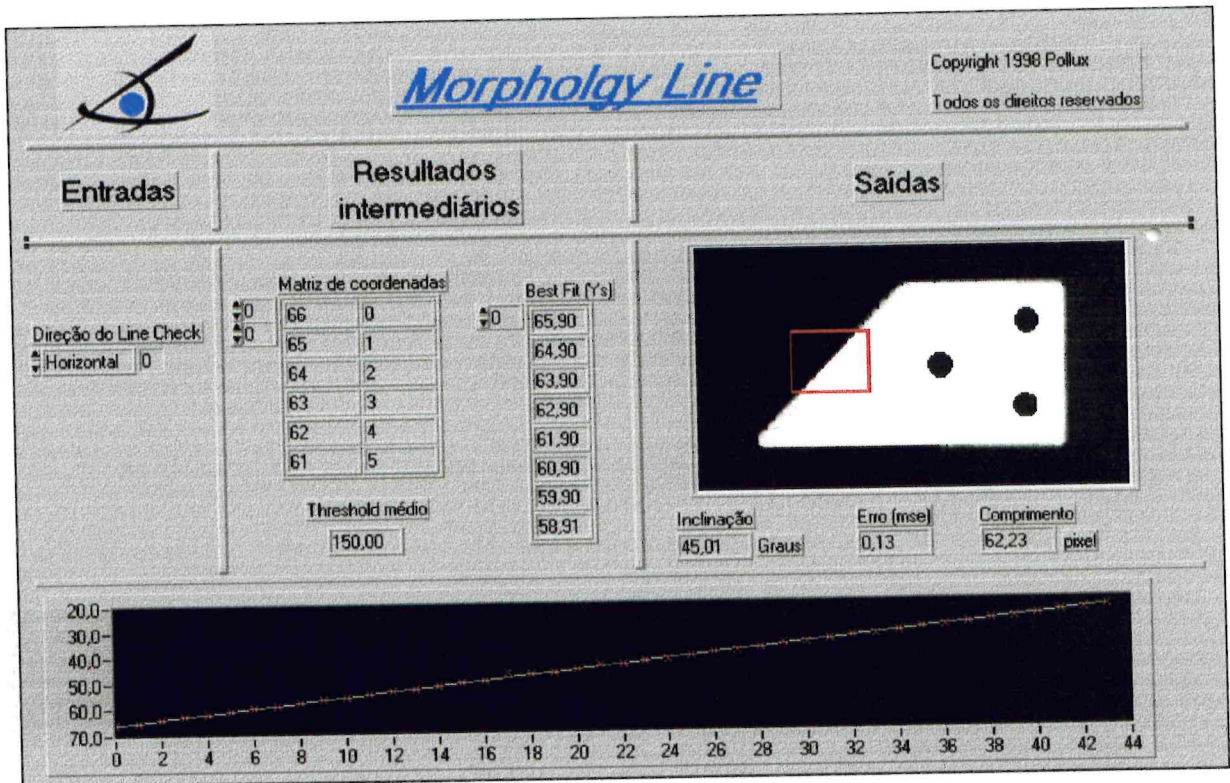
Como a função Arco tangente nem sempre retorna o valor do ângulo no sentido desejado (trigonométrico), somou-se 180 graus a esses casos para contornar possíveis valores negativos dessa função. Para o caso em que os pontos necessitaram rotação de 90 graus, precisou-se corrigir essa defasagem no resultado proveniente do cálculo direto. Essa correção foi feita pela soma de mais 90 graus ao resultado final.

### **5.2.1.3 Comprimento da Reta**

O comprimento da reta foi calculado utilizando-se o Teorema de Pitágoras, aplicando-o para o número de pontos em X e em Y e obtendo como resultado o comprimento médio da “semi-reta” em análise.

## 5.2.2 Aplicação Prática Final

De forma a sanar possíveis dúvidas relacionadas à utilidade e aplicação do “Analisador de Linhas”, foi escolhida uma aplicação utilizada no processo de validação do protótipo que consiste na medição de um suporte chanfrado a 45 graus conforme peça utilizada na validação.



**Figura 32: Painel Frontal do módulo Analisador de linhas**

Conforme pode ser verificado, o valor da inclinação da reta resultante da execução do protótipo na região de interesse indicada, confere em termos qualitativos com a inclinação fornecida. O indicador “erro (mse)” (Eq. 11) mostra que a aproximação obtida pelo método dos mínimos quadrados foi alcançada com sucesso. Isso pode ser afirmado com base no erro quadrático médio, que se demonstrou bastante baixo. Isso ainda pode ser confirmado com o gráfico apresentando, que mostra simultaneamente os pixels marcados pelo “Line Check” com a respectiva reta aproximada pelo protótipo.

Além desses indicadores principais, o protótipo possui um controle de entrada e indicadores intermediários. A entrada se resume a um controle que especifica a direção na qual se vai executar o “Line Check”. Já os controles

intermediários, similarmente a outros protótipos já discutidos, tem função de ajudar em processos de depuração e verificação do correto funcionamento do protótipo. Entre eles está: a matriz de coordenadas, que indica a posição relativa dos pixels selecionados pela passagem do “Line Check”, e uma matriz de pontos ajustados (“Best Fit) que são os valores retornados pelo método dos mínimos quadrados para o ajuste da melhor reta.

Vale ressaltar que os resultados aqui obtidos serviram para validação quanto ao funcionamento do protótipo. Não foram feitos testes para avaliação da incerteza do resultado da medição fornecida. Os testes realizados, no entanto, indicaram resultados perfeitamente coerentes e com muito boa repetitividade, mostrando que, aparentemente a metodologia é viável.

### **5.3 Analisador de Retângulos – “Morphology Rectangle”**

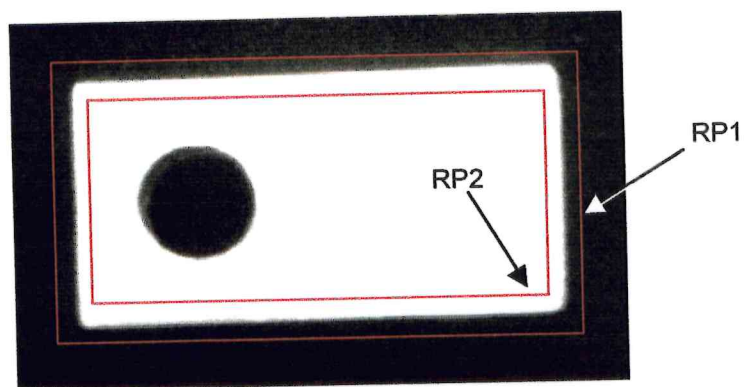
O objetivo desse módulo é fazer uma análise morfológica de retângulos, verificando características como largura, altura, erros de conformidade angular e erros de conformidade linear.

#### **5.3.1 O “Localizador de Retângulos”**

Antes de entrarmos no mérito da análise morfológica, é necessário abordar um tópico de extrema importância para esse módulo: o algoritmo de localização de retângulos em uma imagem. Ele é responsável pela passagem dos pontos formadores do retângulo a ser analisado e é descrito no tópico 5.3.1.1.

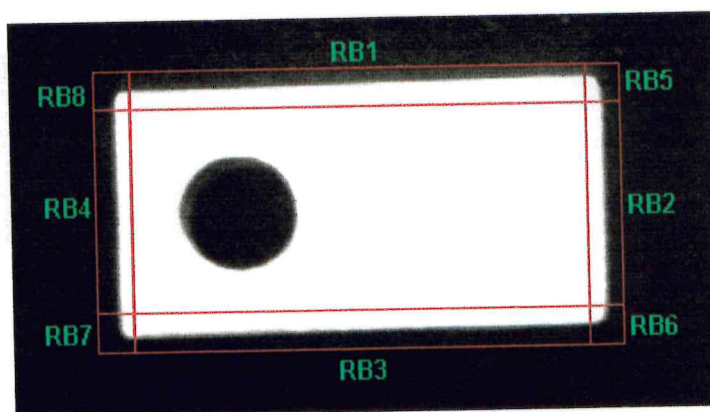
##### **5.3.1.1 O Algoritmo do “Localizador de Retângulos”**

Para a utilização desta ferramenta, é necessário a intervenção do usuário para informar ao algoritmo qual a região onde o retângulo deve ser procurado. Essa região deve ser selecionada conforme a Figura 33.



**Figura 33: Região de busca**

Como pode ser notado, é necessário construir dois retângulos principais (em vermelho) RP1 (grande) e RP2 (pequeno) para indicar a região de busca. Eles devem englobar totalmente a “borda” do retângulo a ser detectado. Após isso, são passadas as coordenadas dos pontos esquerdo superior e direito inferior de cada um. Essas coordenadas são utilizadas para a formação de outras regiões de busca (RB) auxiliares conforme mostra a Figura 34.



**Figura 34: Subregiões de busca**

Para o cálculo das coordenadas (esquerdo superior e direito inferior) de cada região de busca (RB1, RB2...) utilizou-se as posições de RP1 e RP2 conforme a Figura 35 e a Tabela 1.



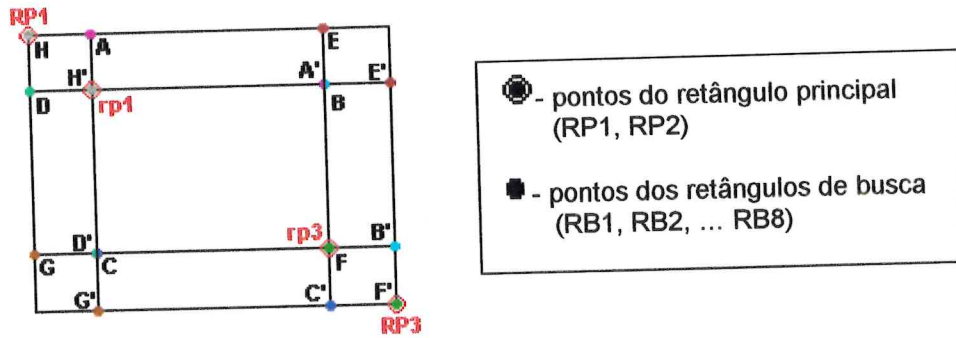


Figura 35. Esquema de pontos dos retângulos de busca

Tabela 1. Tabela de pontos de formação dos retângulos de busca

Retângulo de Busca	Coordenadas descritivas dos Retângulos de busca			
	A		A'	
RB1	X	Y	X	Y
	rp1	RP1	rp3	rp1
RB2	B		B'	
	X	Y	X	Y
RB3	C		C'	
	X	Y	X	Y
RB4	D		D'	
	X	Y	X	Y
RB5	E		E'	
	X	Y	X	Y
RB6	F		F'	
	X	Y	X	Y
RB7	G		G'	
	X	Y	X	Y
RB8	H		H'	
	X	Y	X	Y

O método de localização dos pontos que delimitam o retângulo a ser localizado se altera de acordo com as regiões RBs e sua posição. Para as regiões

cobertas pelos retângulos 1, 2, 3 e 4, optou-se pela utilização de um “Line Check”, visto que os pontos a serem selecionados geram formas que podem ser aproximadas por segmentos de retas. Já no caso das regiões 5, 6, 7 e 8, como as formas a serem localizadas são curvilíneas, necessariamente existe a obrigação da seleção de mais de um ponto em uma mesma linha ou coluna, sendo então o método do “Line Check” impróprio para essa situação.

Para esses casos, optou-se pela utilização de um algoritmo de busca bidirecional. Esse método não se baseia na maior diferença de tom de cinza (‘Line Check), mas sim em uma diferença especificada pelo usuário, permitindo a seleção de mais de um ponto por linha ou coluna. Dessa forma, a localização (seleção dos pontos) do retângulo a ser analisado está completa, sendo então possível a realização do objetivo principal desse protótipo, a análise morfológica do retângulo.

### **5.3.1.2 O Algoritmo de Busca Bidirecional**

Este algoritmo é um mecanismo de busca que percorre uma imagem com o intuito de localizar pares de pixels que possuem uma diferença de tom de cinza previamente determinada. Essa localização permite que se tenha como saída um perfil da geometria sendo analisada. É importante destacar que a qualidade do resultado está diretamente ligada a presença de bons níveis de contraste e nitidez da imagem.

O algoritmo desenvolvido apresenta os seguintes passos:

1. seleção de uma região de interesse onde se vai realizar a busca (no caso proposto, serão os retângulos RB5, RB6, RB7 e RB8) e posterior conversão para uma matriz de tons de cinza;
2. retirada do número de linhas e de colunas da matriz proveniente de 1;
3. realização de uma comparação pixel a pixel com o elemento  $(x+1,y)$  e com  $(x,y+1)$ . A base para essa comparação é uma “diferença de tom de cinza” previamente determinada.

## **5.3.2 Algoritmos Utilizados para a Análise**

### **5.3.2.1 Largura e Altura**

Para o cálculo destas duas dimensões, optou-se pela utilização do valor médio das coordenadas dos pixels selecionados pelas regiões de busca 1, 2, 3 e 4.

Para o caso do cálculo da largura, utilizou-se o valor médio das coordenadas "X" dos pixels selecionados pelo "Line Check" nas regiões RB2 e RB4. Com a altura, procedeu-se da mesma maneira, só que desta vez recuperando o valor médio das coordenadas "Y" dos pixels selecionados nas regiões RB1 e RB3.

### **5.3.2.2 Erros de Conformidade**

Levando em consideração a finalidade do protótipo como um todo, foi necessário implementar uma maneira de classificar as imagens/produtos como rejeito ou aprovação. A maneira encontrada para fazê-lo foi através da verificação da linearidade e da angularidade do retângulo de interesse. Os métodos escolhidos para essa análise são descritos nos tópicos 5.3.2.2.1 e 5.3.2.2.2.

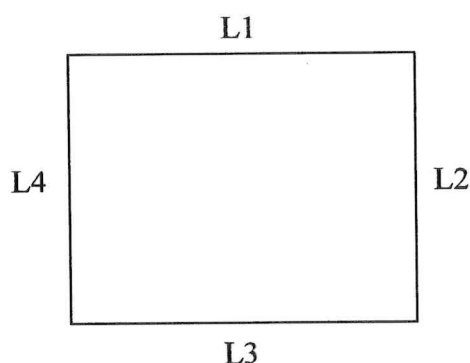
#### **5.3.2.2.1 Erro de Conformidade Linear**

Para a inferência desse tipo de não-conformidade, foi utilizado o método dos mínimos quadrados (similar ao "Morphology Line" em 5.2.1.1) quatro vezes, uma para cada lado, verificando o erro reportado pelo algoritmo reportava. Esse valor é o que pode ser tomado como referência para as operações de aprovação ou reprovação da imagem/peça, podendo ser previamente ajustado através de processo de calibração com peças padrão.

#### **5.3.2.2.2 Erro de Conformidade Angular**

Esse tipo de verificação se baseia no fato de que os lados de um retângulo devem formar ângulos retos entre si. Essa verificação foi feita através da retirada do coeficiente angular da melhor reta ajustada pelo método dos mínimos quadrados para cada lado do retângulo. Após isso foi feita uma subtração dos ângulos

calculados (dois a dois) de tal forma que se obtenha o valor dos ângulos entre L1 e L2, L2 e L3, L3 e L4 e L4 e L1.



**Figura 36: Lados do retângulo para verificação de erro de angularidade**

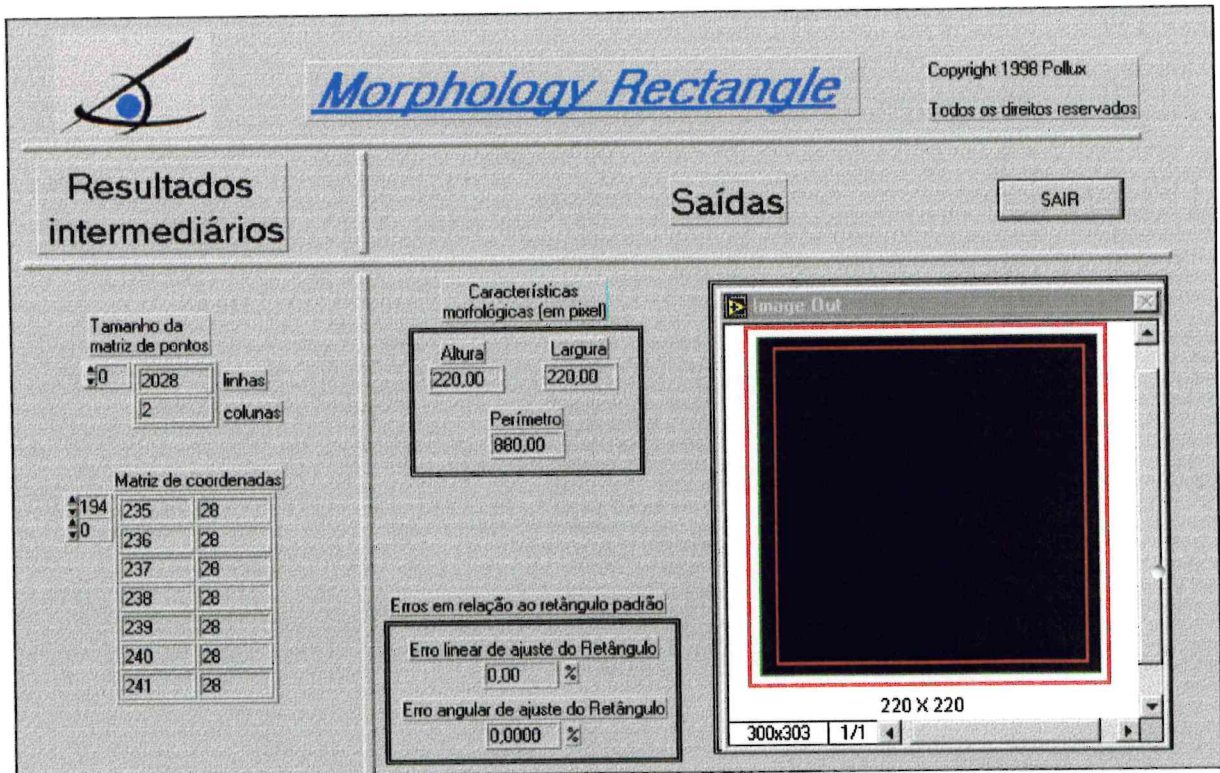
O critério de seleção (aprovação ou reprovação) para as imagens/peças pode ser feito através de processo de comparação desse erro de perpendicularidade, que pode ser ajustado como uma variação percentual em relação a um valor padrão.

### **5.3.3 Aplicação Prática Final**

Para a validação desse protótipo, fez-se dois testes: um com um retângulo “perfeito”, desenhado utilizando um editor gráfico, nas dimensões de 220 x 220 pixels, e um outro utilizando o mesmo suporte da Figura 33.

Como o propósito destes testes é a verificação do funcionamento do módulo e da metodologia adotada apenas sob aspectos qualitativos, os resultados apresentados se apresentam em pixels. No entanto, foi previsto no protótipo a entrada do parâmetro de calibração da relação pixel x mm para a obtenção dos resultados já em mm. Esse parâmetro não está mostrado no painel, pois neste caso específico foi incorporado internamente ao programa.

Este módulo apresenta dois painéis. Um deles é relativo aos resultados internos utilizados na análise morfológica de um retângulo em si. Ele tem papel auxiliar no desenvolvimento da ferramenta, visto que agrega informações úteis para depuração e verificação da metodologia adotada. O outro painel é mais voltado para a aplicação da ferramenta, com apenas dados mais importantes em destaque.

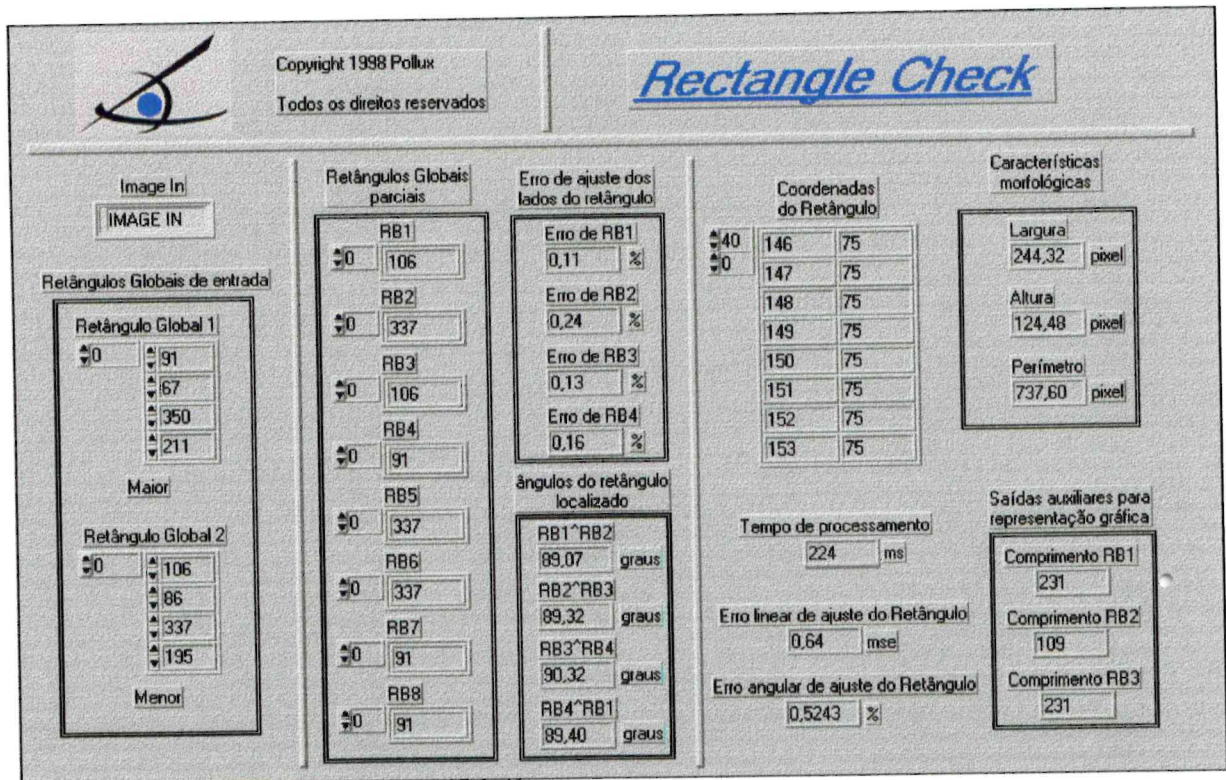


**Figura 37: Painel frontal do módulo Analisador de Retângulos (retângulo “perfeito”)**

Conforme pode ser verificado, a altura, a largura e o perímetro do retângulo em análise estão em conformidade com o padrão utilizado para teste. Os erros de ajuste foram nulos, comprovando que a forma analisada se ajustou perfeitamente à forma de um retângulo.

A coluna de resultados intermediários possui dois indicadores. O primeiro deles, intitulado “Tamanho da matriz de pontos” é dividido em linhas e colunas. O mais importante é o número de linhas pois quantifica o número de pares de pixels que foi processado para se contornar totalmente o retângulo analisado. O tempo de processamento depende diretamente desse valor. O outro indicador mostra as coordenadas dos pixels selecionados. Esses indicadores foram colocados nesse painel para um acompanhamento mais detalhado do processo de detecção do retângulo, servindo de suporte para o diagnóstico de erros de implementação.

Como um segundo exemplo, temos a peça da Figura 34. Um suporte retangular, em alumínio usinado, com boas características de perpendicularidade entre seus lados.

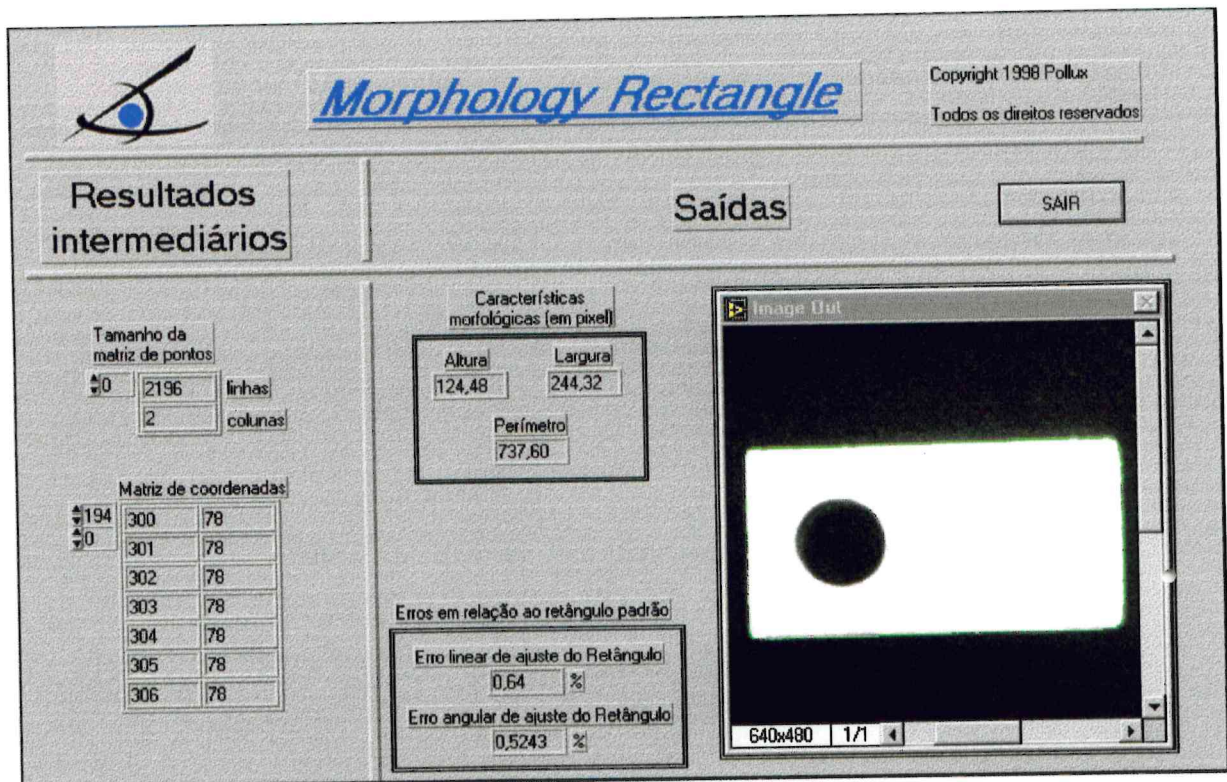


**Figura 38: Painel frontal auxiliar do módulo Analisador de Retângulos (suporte)**

O painel da Figura 38 mostra alguns detalhes internos do processamento da ferramenta na análise do suporte da Figura 33. Os principais são:

- coordenadas dos retângulos globais delimitadores: conforme a Figura 33, dois retângulos globais foram criados. No grupo “retângulos globais de entrada” pode ser vista as coordenadas ajustadas de cada um deles;
- coordenadas dos retângulos de busca auxiliares: no grupo “retângulos globais parciais, pode ser vista as coordenadas de cada retângulo de busca (RBs) auxiliar criado;
- erro de linearidade e perpendicularidade: nesse painel podem ser vistos os erros individuais de linearidade e perpendicularidade para os quatro lados do retângulo analisado;
- tempo de processamento: indica o tempo que foi levado para analisar todo o retângulo. É um resultado bastante sensível ao tamanho do área a ser analisada.

Os demais indicadores já foram explicados anteriormente e serão reaproveitados no painel frontal principal da ferramenta (Figura 39).



**Figura 39: Painel frontal do módulo Analisador de Retângulos (suporte)**

Por se tratar de uma peça mecânica, os resultados denunciam uma certa imperfeição na geometria, conforme pode ser visto nos indicadores de erros de linearidade e de perpendicularidade.

## **5.4 Analisador de circunferências e elipses – “Morphology circle”**

O objetivo deste módulo é fazer uma análise morfológica de formas circulares e elípticas previamente selecionadas por uma ferramenta polar de busca.

A ferramenta desenvolvida tem o propósito de executar as seguintes tarefas:

- cálculo dos raios maior e menor de uma elipse (são iguais no caso de uma circunferência);
- cálculo das coordenadas de centro ( $X_c$ ,  $Y_c$ ) da forma a ser analisada;
- cálculo do perímetro e área da forma analisada;
- cálculo do erro de conformidade.

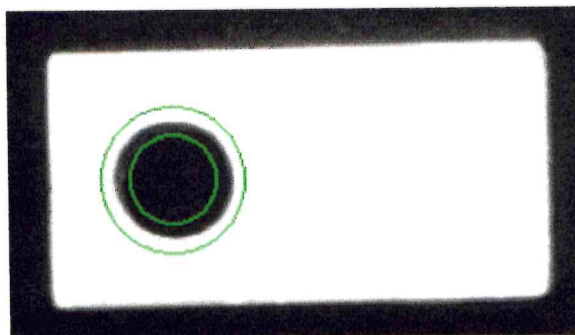
### 5.4.1 O “Localizador de Elipses/Circunferências”

Antes de entrar no mérito da análise morfológica da elipse/circunferência em si, é necessário abordar um tópico de importância para este módulo: o algoritmo de localização da forma na imagem. Esse algoritmo é responsável pela passagem dos pontos formadores da elipse a ser analisada.

#### 5.4.1.1 O Algoritmo do “Localizador de Elipses”

O algoritmo de busca/localização dos pontos deste módulo é baseado na equação da elipse, num incremento angular, e na busca de um gradiente de cinza que caracterize uma mudança de plano.

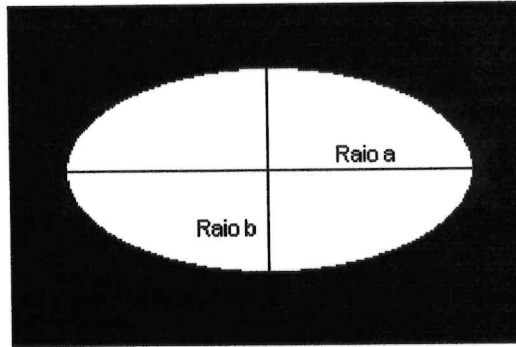
Inicialmente, como na grande maioria dos casos de algoritmos de busca, é necessária uma primeira intervenção do usuário para informar qual a região onde a forma deve ser procurada. Essa região deve ser selecionada de forma a apresentar a mesma configuração que a Figura 40 a seguir:



**Figura 40. Região circular de busca**

Observa-se que é necessário construir duas circunferências ou elipses concêntricas para indicar a região de busca. Elas devem englobar totalmente a “borda” da forma a ser detectada. Após isso, são passadas as coordenadas do retângulo global (pontos esquerdo superior e direito inferior de um retângulo que contém a elipse em questão) respectivo a cada elipse. Essas coordenadas são utilizadas para o cálculo do raio A e do raio B de cada elipse traçada, e inseridas como parâmetros para a equação polar geral da elipse.





**Figura 41. Elipse genérica**

Com a equação da elipse na sua forma polar, um ângulo e os valores de  $a$  e  $b$ , pode-se calcular qualquer ponto pertencente às elipses que determinam a região de busca. A equação polar da elipse está descrita a seguir, podendo-se notar que a única variável necessária para calcular o valor de  $R$  é o ângulo  $\theta$ , com  $a$  e  $b$  conhecidos.

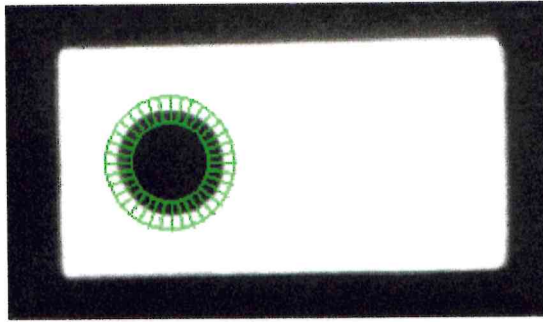
$$(Eq. 12) \quad R^2 = \frac{a^2 \cdot b^2}{a^2 \cdot \text{sen}^2 \theta + b^2 \cdot \text{cos}^2 \theta};$$

$$\text{isolando-se } R: \quad R = \sqrt{\frac{a^2 \cdot b^2}{a^2 \cdot \text{sen}^2 \theta + b^2 \cdot \text{cos}^2 \theta}}. \quad (Eq. 13)$$

Como a função deste algoritmo é localizar os pontos delimitadores da forma a ser analisada, optou-se fazê-lo da seguinte maneira: com as duas elipses delimitadoras da região de busca e suas respectivas equações polares, pode-se calcular um ponto pertencente à mesma através da inserção de um valor para  $\theta$  e a posterior conversão do par  $(R, \theta)$  para  $(X, Y)$  utilizando a seguinte relação:

$$\begin{cases} Y = \text{sen } \theta \cdot R \\ X = \text{cos } \theta \cdot R \end{cases}$$

Dessa forma encontra-se um ponto na elipse menor  $P1$  e outro na maior  $P1'$  (para um mesmo  $\theta$ ). Com esses dois pontos define-se uma reta que vai de  $P1$  a  $P1'$ , e que passa obrigatoriamente pela borda da forma a ser localizada. A Figura 42 mostra essa operação para o caso de um passo de  $\theta = 10$  graus, o que corresponde a 36 retas ( $360 / 10$ ).



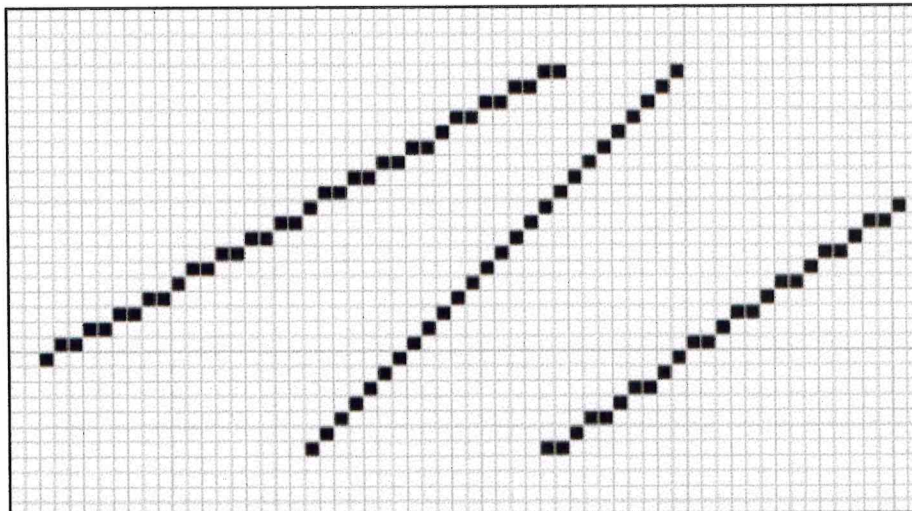
**Figura 42. Retas de ligação**

Para traçar as retas que interligam os pontos  $P_n$  a  $P_{n'}$ , foi necessário o valor do coeficiente angular e linear de cada reta  $n$ . O coeficiente angular pôde ser obtido pelo simples cálculo da tangente do ângulo correspondente a reta em questão, ou seja,  $n.\theta$ . O coeficiente linear foi obtido através da equação da reta:

$$(Eq. 14) \quad y = mx + b \Rightarrow b_n = y_n - m_n \cdot x_n$$

com  $n$  sendo o número do passo correspondente.

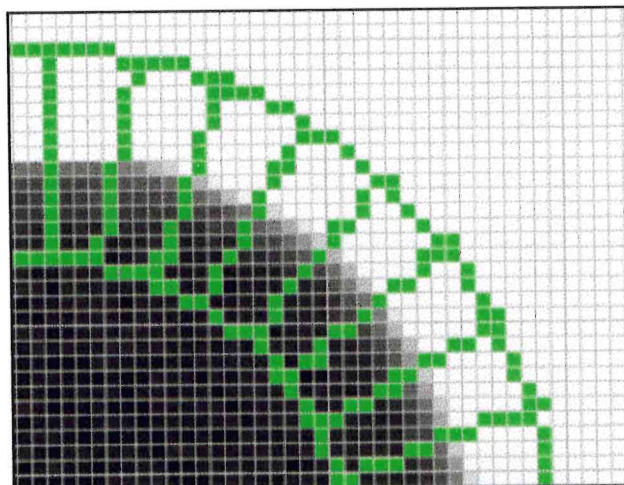
Como o objetivo dessas semi-retas  $P_n - P_{n'}$  é estabelecer uma rota para a busca do par de pixels de maior gradiente de tom de cinza (diferença), foi necessário conhecer as coordenadas dos pontos formadores das mesmas para se efetuar a busca de uma forma a contemplar todos os pixels com uma comparação com seu anterior. A figura a seguir vai exemplificar o problema encontrado.



**Figura 43. Retas com vários coeficientes angulares em uma matriz de pixels**

Como pode ser observado, os pontos que descrevem uma semi-reta são “desenhados” de maneiras diferentes para cada coeficiente angular. No caso de  $m$

corresponder a aproximadamente 45 graus, o passo dos pontos representados se equivale tanto para X quanto para Y. Já nos outros dois casos, os passos são diferentes. Constatou-se que esses passos variam de acordo com o seno de  $m$  e com o cosseno de  $m$ , sendo então possível uma pesquisa sobre os pontos realmente marcados sobre a imagem em questão. Isso é necessário visto que será procurado o par de pixels que possui o maior gradiente de nível de cinza, conforme pode ser observado na figura abaixo.



**Figura 44. Destaque da borda a ser procurada e das retas de procura.**

Cada reta será construída com início em  $P_n$  e fim em  $P_n'$  do seguinte modo:

1.  $y_n = m_n \cdot x_n + b_n$  onde  $m_n$  e  $b_n$  são conhecidos para cada reta;
2.  $x_n$  tem valor inicial equivalente a coordenada X do ponto  $P_n$  e é incrementado de cosseno de  $\theta$  a cada novo passo até alcançar  $P_n'$ ;
3.  $y_n$  é calculado pela equação da reta, recebendo  $x_n$  incrementado a cada laço.

Com a construção das retas ponto a ponto e o posterior armazenamento dessas coordenadas em matrizes, fica facilitada a operação da busca do par de maior gradiente, visto que essa tarefa se reduz a uma simples operação de busca matricial (pixel a pixel).

## 5.4.2 Algoritmo Utilizado para a Análise

O algoritmo escolhido para ajuste da elipse/circunferência é o de Newton Raphson. É um algoritmo iterativo e de rápida convergência que se baseia nos princípios da derivada de uma função.

Neste caso específico, ele vai utilizar como entradas os pontos localizados pelo algoritmo de busca descrito em 5.4.1.1.

```
Variação = qualquer, desde que maior que "erro definido";  
xc = yc = 10;  
a = b = 700;  
Enquanto Variação > "Erro Definido" faça ("erro definido" usual = 0,0001)  
"Erro Quadrático" = 0;
```

```
Para i de 1 até "número de pontos" faça  
% função resíduo calculada em cada ponto  
F(i,1) = - (b^2*(x(i) - xc)^2 + a^2*(y(i) - yc)^2 - a^2*b^2);
```

```
% Calcula erro quadrático: soma dos erros  
Erro = (x(i) - xc)^2/a^2 + (y(i) - yc)^2/b^2 - 1;  
"Erro Quadrático"="Erro Quadrático" + Erro^2;
```

```
% elementos da matriz jacobiana calculada em cada ponto  
J(i,1) = 2*a*(y(i) - yc)^2 - 2*a*b^2; Derivada parcial em relação a "a"  
J(i,2) = 2*b*(x(i) - xc)^2 - 2*b*a^2; Derivada parcial em relação a "b"  
J(i,3) = b^2*(2*xc - 2*x(i)); Derivada parcial em relação a "Xc"  
J(i,4) = a^2*(2*yc - 2*y(i)); Derivada parcial em relação a "Yc"  
End Para;
```

```
% Cálculo do incremento  
Delta = Inv(JT*J)*JT*F; onde: Inv: inversa; JT=J transposta
```

```
% solução do sistema na respectiva iteração
```

```
A = A + Delta(1,1);  
B = B + Delta(2,1);  
Xc = Xc + Delta(3,1);  
Yc = Yc + delta(4,1);
```

```
Variação =  $\sqrt{\text{Delta}(1,1)^2 + \text{Delta}(2,1)^2 + \text{Delta}(3,1)^2 + \text{Delta}(4,1)^2}$  ;
```

```
End Enquanto
```

```
Resultado = [A;B;Xc;Yc];
```

```
%Erro quadrático total
```

```
"Erro quadrático total" = "Erro quadrático";
```

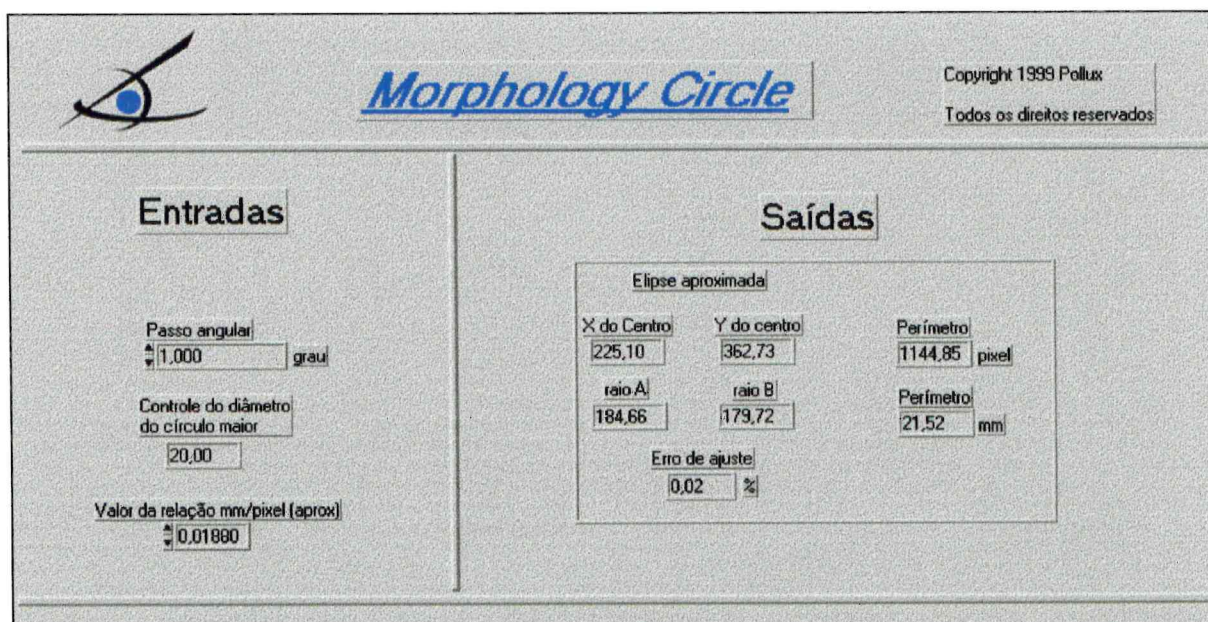
### 5.4.3 Erros de Conformidade

Levando em consideração a finalidade do trabalho como um todo, foi necessário implementar uma maneira de classificar as imagens/produtos como rejeitados ou aprovados. A maneira encontrada para fazê-lo foi através da verificação da circularidade da forma em análise. Para tal, valeu-se do resultado retornado pelo algoritmo em “Erro quadrático total”.

O critério de seleção (aprovação ou reprovação) para as imagens/peças pode ser feito através de processo de calibração desse erro de circularidade, que pode ser ajustado como uma variação percentual em relação a um valor padrão.

### 5.5 Aplicação Prática Final

Foi escolhida uma aplicação prática utilizada no processo de validação do protótipo que consiste na medição do perímetro de um cigarro visto de topo conforme a Figura 46.



**Figura 45: Painel frontal do módulo Analisador de Circunferências e Elipses**

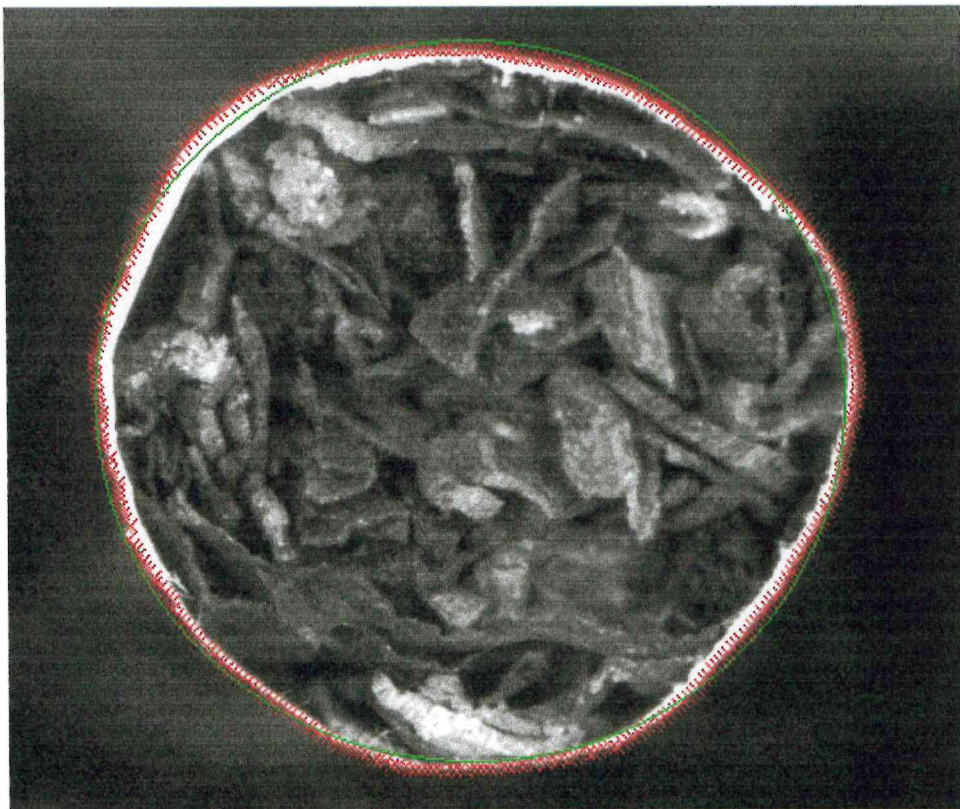
O painel frontal dessa aplicação é bastante simples. Ele apresenta três controles (entradas) que são:

- passo angular: determina o espaçamento angular entre as retas de ligação do método de busca da circunferência;

- controle do diâmetro do círculo maior: para que seja possível a seleção dos pixels é necessário que se crie duas regiões de interesse circulares concêntricas que envolvam a borda da forma a ser detectada. Esse controle delimita o tamanho da elipse externa;
- valor da relação mm/pixel: esse é o valor de calibração do sistema para o cálculo do perímetro. É uma relação fornecida com base em um padrão.

O painel tem como saídas os resultados da análise morfológica citados em 5.4. Eles são:

- coordenadas do centro da circunferência/elipse ajustada pelo método de Newton-Raphson;
- os respectivos comprimentos dos raios da elipse ajustada;
- o perímetro calculado;
- o erro de conformidade caracterizado pelo erro de ajuste dos pixels localizados em relação ao método de Newton-Raphson.



**Figura 46: Imagem de um cigarro (vista superior)**

Após a passagem da ferramenta pela imagem do cigarro, o que se obtém, conforme pode ser observado na Figura 46, é a localização dos pixels de transição (em vermelho) e o traçado da melhor elipse ajustada (em verde). Com as corretas dimensões da elipse é possível calcular o seu perímetro pela aplicação direta da equação:

$$(Eq. 15) \text{ Perímetro} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (a^2 + b^2)}$$

## 5.6 Conclusão

Face aos resultados apresentados nas respectivas fases de validação de cada módulo, os métodos utilizados atenderam aos requisitos qualitativos exigidos. Entretanto uma análise mais detalhada dos métodos de medição é necessária, de forma a se ter uma avaliação, a nível quantitativo (análise de incertezas), de cada ferramenta.

É importante destacar que o resultado das medições é sensível a diversos fatores externos e internos ao sistema tais como: iluminação, foco, vibrações, entre outros. Sendo assim, o desempenho metrológico das ferramentas está diretamente ligado à qualidade das imagem adquiridas, que devem apresentar bom contraste e alta nitidez.

Os módulos de análise morfológica trabalham em perfeita harmonia com o “Locate Tool”, sendo então aplicáveis também nos casos onde esse acessório é requerido.

# Capítulo 6: Propostas de Diretrizes para a Avaliação da Incerteza de Sistemas de Medição

## 6.1 Introdução

Quando se relata o resultado da medição de uma grandeza física é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua incerteza. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados com outros valores medidos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou norma. É, portanto, necessário que haja um procedimento prontamente implementado, facilmente compreendido e de aceitação geral para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição; isto é: para avaliar e expressar sua incerteza [ 21 ].

Da mesma forma como o uso quase universal do Sistema Internacional de Unidades (SI) trouxe coerência a todas as medições científicas e tecnológicas, um consenso mundial sobre a avaliação e expressão da incerteza de medição permitiria que o significado de um vasto espectro de resultados de medições na ciência, engenharia, comércio, indústria e regulamentação, fosse prontamente compreendido e apropriadamente interpretado. Nesta era de mercado global, é imperativo que o método para avaliar e expressar a incerteza seja uniforme em todo o mundo, de forma tal que as medições realizadas em diferentes países possam ser facilmente comparadas [ 21 ].

O método ideal para avaliar e expressar a incerteza do resultado de uma medição deve ser universal, ou seja, o método deve ser aplicável a todas as espécies de medição e a todos os tipos de dados de entrada usados nas medições.

A grandeza real usada para expressar a incerteza deve ser:

- internamente consistente: deve ser diretamente derivável dos componentes que para ela contribuem, assim como ser independente de como estes componentes estejam agrupados, ou da decomposição de componentes em subcomponentes;



- transferível: deve ser possível usar diretamente a incerteza avaliada para um resultado como um componente na avaliação da incerteza de outra medição na qual o primeiro resultado é utilizado.

Além disso, em muitas aplicações industriais e comerciais, assim como nas áreas da saúde e segurança, é freqüentemente necessário fornecer um intervalo em torno do resultado de medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição de valores, que poderiam razoavelmente ser atribuídos à grandeza sujeita à medição. Assim, o método ideal para avaliar e expressar incerteza de medição deve ser capaz de fornecer prontamente tal intervalo, em particular, com uma probabilidade da abrangência ou nível da confiança que corresponda, de uma forma realista, ao nível requerido [ 21 ].

Diante desse quadro, com o intuito de seguir uma tendência mundial, neste capítulo discute-se algumas propostas de realização de estudo metrológico para sistemas de medição. Para tal, leva-se em consideração as determinações do Guia da ISO [ 21 ], com o propósito de delinear algumas diretrizes a serem seguidas no tratamento das incertezas dos sistemas de medição.

É importante definir que o objetivo deste capítulo não é calcular as incertezas do processo de medição em questão, mas sim discutir formas de estudo das mesmas, indicando possíveis caminhos e dificuldades nessa avaliação.

## **6.2 Avaliação da Incerteza de um Processo de Medição**

O principal indicativo da qualidade de um resultado de uma medição é a sua incerteza, do que se deduz a necessidade de se utilizar procedimentos confiáveis e representativos para sua determinação [ 19 ]. Nesse sentido, recomenda-se adotar como base referencial para os procedimentos formais do sistema de garantia da qualidade (procedimentos de seleção, avaliação de conformidade, incerteza de medição, entre outros), as normas e documentos de referência elaborados por organizações internacionais reconhecidas como é o caso da ISO (International Organization for Standardization) e do BIPM (Bureau International des Poids et Mesures).

Recentes pesquisas indicam que a metodologia de avaliação e expressão de incerteza de medição estabelecida no documento do BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), o "ISO-GUM" [ 21 ], está pouco disseminada no meio industrial [ 19 ]. Outro dado de importante relevância é que a estimativa de incerteza de medição em medições no chão de fábrica normalmente não é realizada [ 19 ].

A metodologia ideal para avaliação e expressão de incerteza de medição, seja nas atividades de calibração ou nas medições no processo ou chão de fábrica, deve possuir as seguintes características:

1. a metodologia deve ser universal, ou seja, aplicável a todas as espécies de medições e a todos os tipos de dados de entrada usados nas medições;
2. método deve fornecer um intervalo em torno da estimativa do valor do mensurando com o qual se espera abranger, com um nível da confiança definido, grande porção dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando;
3. a grandeza usada para expressar esse intervalo em torno da estimativa do valor do mensurando, ou seja, a incerteza, deve ser internamente consistente. Isso significa que a grandeza deve ser derivável dos componentes que contribuem para sua determinação, independentemente da forma com que esses componentes são agrupados ou decompostos em subcomponentes;
4. a grandeza utilizada para expressar a incerteza de medição deve ser transferível. Portanto o método deve permitir que a incerteza avaliada de um resultado de medição seja usada diretamente como componente na avaliação de incerteza de outra medição na qual o primeiro resultado é utilizado.

A falta de consenso na forma de avaliar e expressar a incerteza de medição gerou até a década de 80, diversas formas de avaliação e expressão da incerteza de medição entre laboratórios metrológicos desde o nível primário até os industriais [ 19 ].

Reconhecendo a falta de consenso internacional acerca da avaliação de incerteza de medição, o BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) juntamente com organizações internacionais publicaram, em 1993, o documento

denominado "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", recomendando regras gerais para avaliação e expressão da incerteza de medição.

Diversos documentos ou guias específicos baseados nesse documento têm sido desenvolvidos para aplicações em áreas específicas.

A seguir são analisados os métodos de avaliação de incertezas definidos no Guia para expressão da incerteza de medição- "ISO-GUM" [ 21 ].

### **6.2.1 Guia para Expressão da Incerteza de Medição - "ISO-GUM"**

O "ISO-GUM" [ 21 ] estabelece regras gerais para avaliar e expressar a incerteza de medição, que podem ser seguidas em vários níveis de exatidão e em muitos campos, desde o chão de fábrica até a pesquisa fundamental.

No Brasil, "O Guia" ou "ISO-GUM" como é comumente denominado, teve sua primeira versão em português publicada em agosto de 1997, e mais recentemente, em 1998, sua segunda versão com revisão de alguns termos adotados na versão anterior.

A fundamentação do "ISO-GUM" baseia-se na recomendação INC-1 de 1980 elaborada pelo BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), que estabelece procedimentos estatísticos para avaliação da incerteza de medição. Os fundamentos são apresentados a seguir:

1. os componentes de incertezas provenientes de efeitos aleatórios e de correções para efeitos sistemáticos são tratados indistintamente. Todos são combinados utilizando-se a lei de propagação das incertezas. A classificação do método de avaliação desses componentes em Tipo A (avaliados por meios estatísticos) e Tipo B (avaliado por outros meios) é desnecessária operacionalmente;
2. os componentes de incertezas avaliados pelo método Tipo A são caracterizados pelas variâncias estimadas (ou desvios padrão estimados) e o número de graus de liberdade. Os componentes avaliados pelo método Tipo B também são caracterizados por variâncias estimadas (ou desvios padrão estimados) de distribuições de probabilidade assumidas. As covariâncias, quando houver componentes correlacionados, devem ser fornecidas;

3. a combinação das variâncias pela teoria da propagação das incertezas (combinação dos desvios padrão das distribuições de probabilidades assumidas) deve apresentar o resultado dessa combinação (incerteza padrão combinada) e seus componentes (incertezas padrão), na forma de desvio padrão. Havendo a necessidade de se expressar a incerteza padrão combinada como uma incerteza expandida com nível da confiança maior que 68%, o fator multiplicador (fator de abrangência) deve ser informado.

A metodologia usada no "ISO-GUM" é apresentada de uma forma resumida na Figura 47.

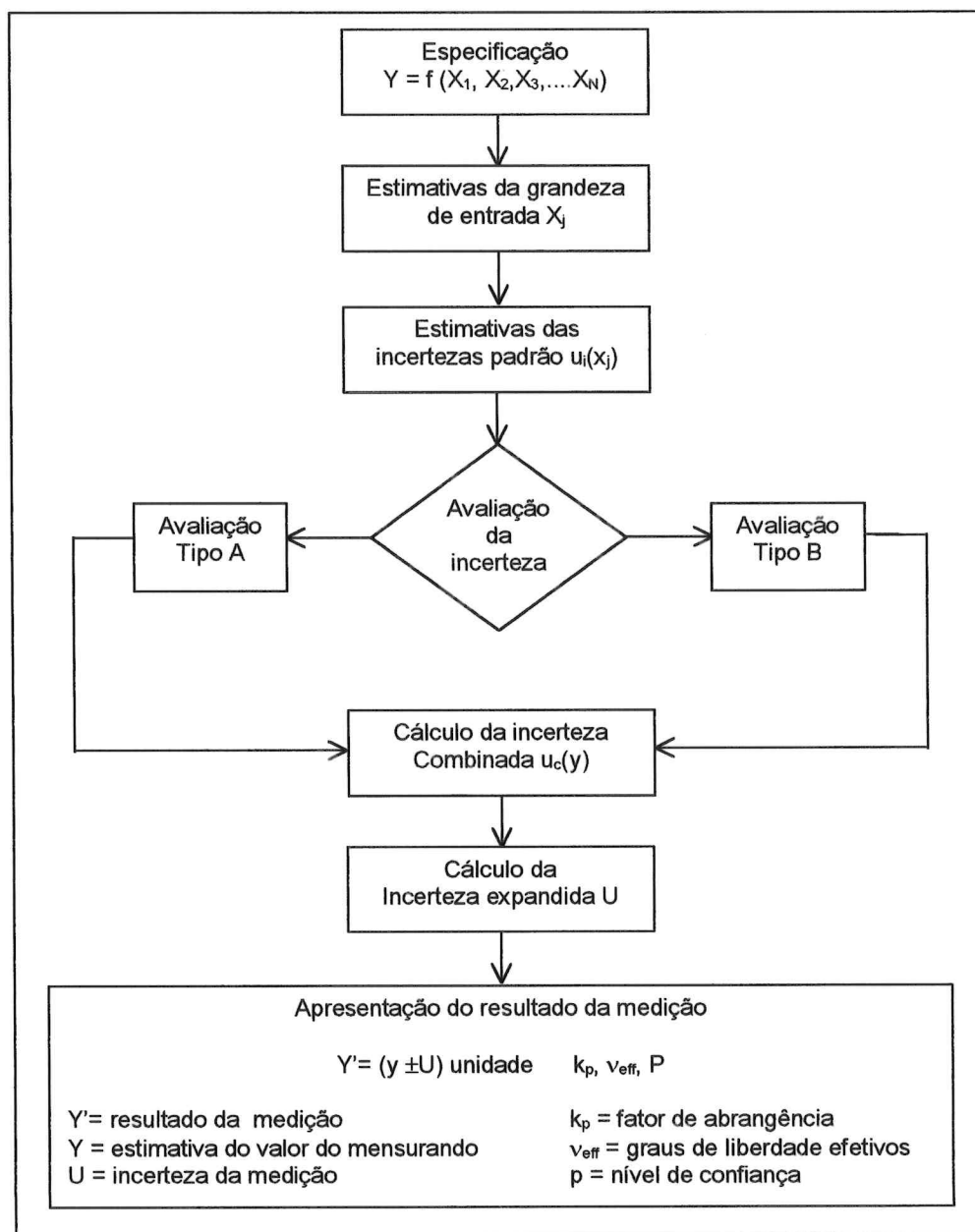


Figura 47: Fluxograma de avaliação e expressão da incerteza de medição pelo "ISO-GUM"

A utilização da metodologia estabelecida no "ISO-GUM" está bastante disseminada entre os laboratórios de calibração, especialmente nos que integram a Rede Brasileira de Calibração - RBC.

No meio industrial, a situação é inversa [ 19 ]. Em recentes pesquisas realizadas em empresas certificadas com ISO 9000, constatou-se um pequeno número de adesões aos métodos do guia, sendo que alguns procedimentos ainda foram cometidos erros conceituais.

Os fatos de o "ISO-GUM" ser pouco difundido no meio industrial, ao mesmo tempo que é aplicável na indústria, são justificados a seguir:

a pouco difundido no meio industrial:

a.1 a forma de avaliação de incerteza de medição definida no "ISO-GUM" é muito recente se comparada com o tempo de existência dos métodos tradicionais de avaliação de incertezas. Desse modo, é plenamente justificável que laboratórios metrológicos, principalmente os industriais, sintam dificuldades para adoção da nova metodologia;

a.2 aliado ao fato anterior, tem-se a questão histórica de que as normas de garantia da qualidade (como as da série ISO 9000 e seus documentos complementares) são objetivas nos aspectos metrológicos por elas exigidos n que tange à exigência de uma avaliação de incertezas de medição, mas não recomendam que método deve ser aplicado;

a.3 a forma de apresentação do "ISO-GUM" como um "texto científico", pode contribuir para uma falsa impressão de que o mesmo é direcionado apenas para aplicações em laboratórios de referência ou para a pesquisa científica;

b aplicável nas indústrias:

b.1 rigor na aplicação do "ISO-GUM" nas medições industriais depende do nível da incerteza requerido para o processo de medição; ponderando-se dessa forma, entre o rigor no levantamento dos componentes de incertezas e os recursos disponíveis de tempo, material e de pessoal da empresa;

- b.2 os procedimentos de cálculo e os registros das informações são atualmente bastante facilitados pelo uso de programas computacionais disponíveis ou pela aplicação de planilhas de cálculo;
- b.3 "ISO-GUM" relaciona-se com diversos documentos ou normas aplicados no contexto da garantia da qualidade, sendo fácil de integrá-lo como um documento de referência para os procedimentos do Sistema de Garantia da Qualidade Metrológica.

### **6.3 Principais Fontes de Incerteza dos Sistemas de Medição Baseados em Visão**

Em sistema de medição baseados em visão, diversas fontes de incerteza podem ser listadas:

- resolução do CCD da câmera;
- distorção das lentes;
- patamar de binarização da imagem;
- focalização da imagem;
- iluminação;
- vibração do sistema;
- incerteza do padrão de calibração;
- incerteza do algoritmo (interpolações e arredondamentos);
- incerteza do posicionamento da peça a ser medida (em relação a uma posição padrão).

#### **6.3.1 Diretrizes para Avaliação da Incerteza de um Sistema de Medição por Visão**

A definição de diretrizes para a avaliação de incertezas obrigatoriamente se relaciona com a quantificação das fontes de incerteza determinadas. Para os sistemas de visão que vierem a ser implementados utilizando as ferramentas

desenvolvidas neste trabalho existem inúmeras dificuldades para a realização de tal tarefa. Entre elas podemos listar:

- dificuldade de análise isolada de cada fonte de incerteza;
- ausência ou dificuldade de obtenção de modelos matemáticos que relacionem a fonte de incerteza com a produção de um deslocamento no sistema de medição;
- inexistência da maioria das especificações dos fabricantes, entre outras.

Frente a esse quadro desfavorável, e tendo como referência as recomendações do guia da ISO, é proposto neste trabalho que para a avaliação metrológica sejam feitas adaptações ao seqüenciamento tradicional que o guia da ISO propõe.

As alternativas analisadas se resumem em três:

1. seguir todos os passos que o guia propõe e aplicá-lo na íntegra;
2. proceder uma calibração do sistema no local de seu funcionamento;
3. proceder uma calibração do sistema no local de seu funcionamento e analisar em conjunto as fontes de incerteza mais críticas.

O primeiro caminho se mostra bastante dificultoso devido aos problemas relacionados com a quantificação e isolamento das fontes de incerteza. A grande ausência de informações técnicas com enfoque metrológico e a dificuldade de utilização e desenvolvimento de modelos matemáticos que relacionem a fonte de incerteza com um desvio proporcional, se mostram como grandes barreiras para a tomada desse caminho.

A segunda alternativa, nos leva ao procedimento de calibração para cada aplicação em específico, ou seja, os resultados obtidos são válidos apenas para as condições ao qual o sistema está submetido no momento da calibração. Como os sistemas em questão são desenvolvidos com o propósito de utilização em chão de fábrica, as chances de um maior controle das influências externas ao sistema são impraticáveis na grande maioria dos casos, de maneira que o resultado obtido perde demasiadamente em robustez.

Tendo em vista a dificuldade de aplicação da primeira alternativa (ideal) e os problemas da utilização da calibração “in loco” (segunda proposta), optou-se por se defender uma terceira proposta que se demonstra um balanceamento das duas anteriores. Essa proposta visa dar uma adaptação à utilização do guia da ISO para o caso em específico, sem a descaracterização do mesmo. Para tal, o segundo procedimento deve ser realizado, seguido pelo levantamento das principais fontes de incerteza incidentes sobre o sistema. Após isso, uma posterior verificação das fontes mais influentes em termos de chão de fábrica deve ser levada em consideração. Com isso, pode-se fazer o caminho inverso e se ter uma noção da influência de cada uma dessas fontes no sistema global.

## **6.4 Conclusão**

É relevante afirmar que a certificação ISO 9000 exige que os processos que envolvem medição ou inspeção tenham sua respectiva avaliação com relação a confiabilidade dos seus resultados. Isto ocorre visto que a mesma visa a determinação detalhada dos processos produtivos, exigindo parâmetros para atestar conformidades de fabricação. Diante disso, uma análise que ateste a qualidade da inspeção para determinadas condições é sempre requerida, mesmo para os casos de inspeção grosseira, onde os objetivos são claramente de seleção.

A grande dificuldade na quantificação das fontes de incerteza inerentes aos sistemas de medição baseados em visão causa a busca de meios alternativos de avaliação da incerteza conforme a diretriz proposta neste capítulo.

A falta de uma normalização específica para a avaliação de sistemas baseados em visão e a indisponibilidade da grande maioria das especificações de importância metrológica vêm adicionar complicadores para a realização dessa tarefa.

A própria natureza de utilização dos sistemas de visão, direciona o seu processo de calibração para o chão de fábrica. Isso é de certa maneira viável em vista da necessidade de se efetuar tal operação em condições próximas da qual o sistema opera. A falta de procedimentos padronizados para a calibração em chão de fábrica vem adicionar dificuldade para a execução dessa tarefa.



Outra característica inerente a esses sistemas é a dificuldade de se tratar separadamente as fontes de incerteza. Entretanto, pelo fato do guia da ISO ser internamente consistente, a análise agrupada de fontes é permitida, tornando mais viável na prática a determinação da incerteza combinada.

A análise das fontes de incerteza leva a um processo de calibração que deve ser específico para cada caso. Além disso, outro ponto importante diz respeito à necessidade de um acompanhamento redundante da inspeção por um período de validação, de forma similar ao empregado em sistemas de decisão baseados em redes neurais.

## Capítulo 7: Conclusões

A oportunidade oferecida pelo Curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial para a realização da disciplina de Projeto de Fim de Curso no setor privado só tem a contribuir para a formação de seus engenheiros. É seguindo esse propósito que foi escolhido para a realização deste projeto uma empresa de base tecnológica de pequeno porte.

Com o intenso crescimento do setor de serviços e a terceirização, as pequenas empresas têm se proliferado. Essas empresas tem como maior vantagem competitiva a rapidez nas decisões, e acima de tudo a sua capacidade intelectual. É devido a essas e outras características que esse tipo de empresa vêm se consagrando como o melhor ambiente para aprendizado e intercâmbio tecnológico. A estrutura organizacional extremamente horizontal dessas empresas possibilita um estreitamento na relação entre o orientador (da empresa) e seu orientado, visto que na grande maioria dos casos, essa relação não deixa de ser similar a de chefe e empregado.

No que diz respeito às empresas de base tecnológica, onde normalmente os projetos estão inseridos num contexto maior – como o caso deste projeto – a estreita relação com o orientador proporciona uma visão global do projeto, gerando conhecimentos sólidos e uma verdadeira oportunidade de colaboração em termos práticos e científicos.

O trabalho desenvolvido teve sua ligação com o curso estabelecida de diversas maneiras, seja através de disciplinas, estágios, bibliografias ou apostilas. Pode-se dizer que sua maior colaboração se deu no estágio curricular. Isto devido ao fato de permitir um contato prévio com a ferramenta de desenvolvimento deste projeto, o LabVIEW, constatando-a como um verdadeiro potencial tanto no meio acadêmico quanto industrial.

Observando sob a ótica empresarial, a realização deste projeto se consagrou como uma efetiva contribuição no desenvolvimento do software global, denominado POLLUX 1000. Esta contribuição se deu na forma do desenvolvimento na íntegra de

protótipos totalmente funcionais. Os respectivos testes foram feitos com amostras provenientes de futuros clientes, confirmando a coerência com a metodologia da prototipação, que prevê a participação dos clientes no desenvolvimento.

A realização deste trabalho vem como um subsídio para a comprovação da importância da automação da medição para a indústria, visto que se insere no contexto maior de um sistema industrial de inspeção e medição. Ainda nesse sentido, sendo o software voltado tanto para o mercado interno quanto externo, ele segue uma tendência mundial de modularização.

Da mesma forma que o hardware vem sendo padronizado, os softwares também estão de forma crescente sendo oferecidos padronizados e na forma universal em termos de plataforma de hardware [ 3 ]. Além disso, a modularidade permite que se possa configurá-lo para cada aplicação do usuário. Em razão disso que os módulos desenvolvidos apresentam-se de forma praticamente independentes, possibilitando redução de custo tanto na implantação inicial quanto na possibilidade de acréscimo de funções.

A oportunidade de participação efetiva no desenvolvimento e aplicação das ferramentas de visão, possibilitaram que testes de hipóteses levantadas fossem feitos. Isso contribuiu para a escolha de um melhor método para o desempenho da tarefa em estudo, confirmando a posição deste trabalho como de verdadeiro desenvolvimento tecnológico. Um grande colaborador para isso foi a escolha do software LabVIEW, que permitiu o desenvolvimento rápido dos diversos protótipos e seus posteriores testes.

Em particular, a importância do projeto de fim de curso como meio de complementação de aprendizado veio suprir o conhecimento de uma verdadeira realidade na área da automação industrial: os sistemas de visão. Esse conhecimento veio de forma bastante sólida, pois foi adquirido com o desenvolvimento das ferramentas de visão. Isso exigiu que toda a instrumentação inerente aos sistemas como câmeras CCD, conjuntos ópticos e configurações de iluminação tivessem que ser previamente estudados para uma posterior aplicação, contribuindo para o conhecimento da área de visão como um todo. Além disso, a participação em atividades diversas relacionadas à empresa proporcionaram uma

oportunidade ímpar de crescimento, mostrando as várias facetas da realidade empresarial e da vida profissional de um engenheiro.

Enfim, entre os inúmeros objetivos que o projeto de fim de curso propõe, pode-se afirmar com certeza que estes foram alcançados. Mais do que a simples complementação curricular ou familiarização com a realidade do trabalho de um engenheiro, a chance de desenvolver habilidades, analisar situações e propor mudanças, complementou o processo ensino-aprendizagem. É através do trabalho prático que se consegue localizar as deficiências individuais e buscar o incentivo para um melhor aprimoramento tanto a nível pessoal quanto profissional. Dessa forma o impacto da passagem da vida estudantil para a vida profissional é diminuído, pois este abre oportunidades diversas de conhecimento, promovendo um leque de opções para a busca do desenvolvimento das potencialidades individuais. Isso propicia a formação de um profissional com características empreendedoras, inovadoras e alternativas, aliando não só ciência à prática, mas sim à criatividade.

## **Bibliografia:**

- [ 1 ] JAIN, Ramesh; KASTURI, Rangachar; SCHUNCK, Brian G. **Machine Vision**. EUA : McGraw-Hill, 1995.
- [ 2 ] SPIEGEL, Murray R. **Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas de Matemática**. 2ª ed. São Paulo : MAKRON Books do Brasil, 1992.
- [ 3 ] FLESCHE, Carlos Alberto. **Medição de Grandezas Mecânicas**. Florianópolis /SC. Apostila, 1998 – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Metrologia e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- [ 4 ] GONÇALVES JR., Armando A. **Metrologia Parte 1**. Florianópolis /SC. Apostila, 1998 – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Metrologia e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- [ 5 ] FARINES, Jean Marie; PIMENTA, Marcelo. **Metodologias de Concepção de Softwares e de Sistemas**. Caxias do Sul/RS. Apostila, 1994 – Curso de Pós-Graduação em Automação Industrial a Nível de Especialização – Laboratório de Controle e Microinformática, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- [ 6 ] NATIONAL INSTRUMENTS. **IMAQ Vision for LabVIEW Reference Manual**. USA, 1996.
- [ 7 ] NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Reference Manual**. USA, 1996.
- [ 8 ] NATIONAL INSTRUMENTS. **Instrumentation Catalogue**: 1999.
- [ 9 ] NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Basics Course** (Course Software Version 4.0). USA, 1998.
- [ 10 ] SEITZ, Peter. Optical Superresolution Using Solid-State Cameras and Digital Signal Processing, **Optical Engineering**, Vol. 27, Nº 7, pp. 535-540, 1988.

- [ 11 ] SNYDER, W.E.; BILBRO, G.L. Correction of Distortions in Optical Coordinate Measuring Machines. **Society of Manufacturing Engineers**. SME identification: Paper no. B1501037.
- [ 12 ] LIN, Paul P; PARWIN, Fuoad. Edge Detection with Subpixel Resolution and its Application to. **Society of Manufacturing Engineers**. SME identification: Paper no. MS9000576.
- [ 13 ] LOOMIS, John S. Edge Finding Algorithm wiht Subpixel Resolution. **Society of Manufacturing Engineers**. SME identification: Paper no. MS890211.
- [ 14 ] LAPIDUS, Stanley N.; ENGLANDER, Arnold C. Understanding How Images are Digitized. **Society of Manufacturing Engineers**. SME identification: Paper no. MS850228.
- [ 15 ] NEGIN, Michael. Subpixel Resolution Methodology Limitations. **Society of Manufacturing Engineers**. SME identification: Paper no. IQ870397.
- [ 16 ] BARP, Alexandre Moraes. **Medição de Temperatura para Determinação de Rendimento de Bombas Hidráulicas**, Monografia submetida à UFSC para aprovação da disciplina EEL 5901: Projeto de Fim de Curso, DAS - UFSC, 1997.
- [ 17 ] PEZZOTTA, Carlos Aurélio. **Plataforma Experimental para Ensino de Metrologia Automatizada**. Relatório de Estágio submetido à UFSC para aprovação da disciplina EEL 5950: Estágio em Controle e Automação Industrial, DAS - UFSC, 1997.
- [ 18 ] DONATELLI, Gustavo D. **Capability of Measurement Systems for 100% Inspection Tasks**. Tese submetida à UFSC para obtenção de grau de Doutor em Metrologia. LABMETRO – UFSC, 1999.
- [ 19 ] SOARES JR., Luíz. **Confiabilidade Metrológica no Contexto da Garantia da Qualidade Industrial, Diagnóstico e Sistematização de Procedimentos**. Dissertação submetida à UFSC para obtenção de grau de Mestre em Metrologia. LABMETRO – UFSC, 1999.

- [ 20 ] FANTIN, Analúcia V. **Medição de Superfícies Livres Tridimensionais por Topogrametria**. Dissertação submetida à UFSC para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica. LABMETRO – UFSC, 1999.
- [ 21 ] BIPM; et alii. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição**. Segunda Edição Brasileira do "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Programa RH-Metrologia, Rio de Janeiro: 1998.
- [ 22 ] Endereço da INTERNET. **[www.genscan.com](http://www.genscan.com)**
- [ 23 ] Endereço da INTERNET. **[www.pollux.com.br](http://www.pollux.com.br)**
- [ 24 ] Endereço da INTERNET. **[www.sony.com](http://www.sony.com)**
- [ 25 ] Endereço da INTERNET. **[www.pentax.com](http://www.pentax.com)**
- [ 26 ] Endereço da INTERNET. **[www.sme.org](http://www.sme.org)**