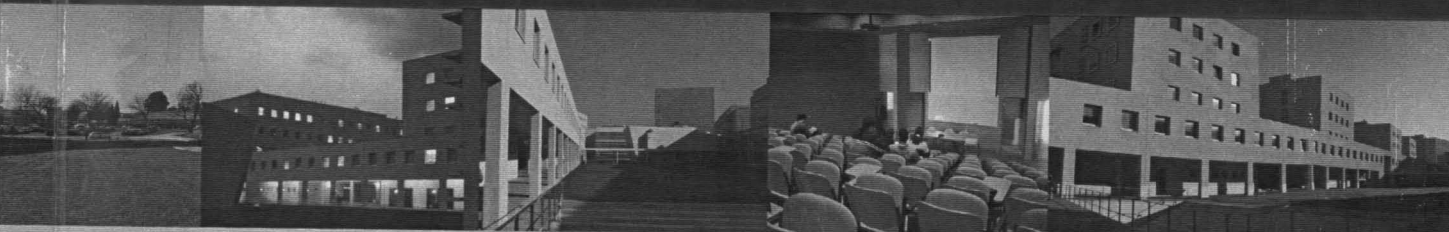




Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

**FEUP**



José Luís Sousa Magalhães Lima

# Sistema de Aquisição de Imagem Via Ethernet e Processamento em Tempo Real

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

**Sistema de Aquisição de Imagem Via Ethernet  
e Processamento em Tempo Real**

José Luís Sousa Magalhães Lima

Licenciado em Engenharia Electrotécnica  
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos  
requisitos do grau de mestre em  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
(Área de especialização de Informática Industrial)

Dissertação realizada sob a supervisão do  
Professor Doutor Paulo José Cerqueira Gomes da Costa  
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Setembro de 2003

Aos meus Pais e à Luísa

## **Agradecimentos**

Ao Professor Doutor Paulo Costa, orientador da presente dissertação, quero expressar o meu profundo agradecimento pela sua disponibilidade, incentivo, orientação e amizade.

Ao Professor Doutor António Paulo Moreira, a minha gratidão pelo interesse e dedicação assim como pela amizade demonstrada.

Aos colegas de laboratório, António Neves e Joaquim Pereira, pela ajuda e amizade que sempre demonstraram.

A todos os meus colegas da FEUP que me apoiaram neste projecto.

Ao I.P.B pelas condições que me proporcionou.

À Luísa, pela paciência e compreensão nos momentos menos bons do meu esforço, entre outras coisas.

Finalmente, um agradecimento muito especial aos meus pais pela forma insuperável como me acompanharam e ajudaram, e sem os quais este trabalho não teria sido possível.

---

<sup>1</sup> In theory, there is no difference between theory and practice. But, in practice, there is."

Jan L.A. Van de Snepscheut

---

<sup>1</sup> Teoricamente, não há diferença entre a teoria e a prática. Mas na prática, existe.

## Resumo

Nas últimas décadas, o aparecimento de semicondutores fotossensíveis aliado á crescente capacidade de processamento disponível, permitiu o desenvolvimento de ferramentas capazes de substituir pessoas em tarefas perigosas, repetitivas ou degradantes.

Esta dissertação começa com uma descrição do *hardware* utilizado, nomeadamente elementos fotossensíveis, condicionamento, conversão de sinal e rede ethernet.

Em seguida, apresenta o *software* desenvolvido para aquisição e processamento de imagem. Do ponto de vista do processamento, foram utilizados algoritmos de manipulação morfológica de imagem, convolução, detecção de defeitos, binarização, entre outros.

Essencialmente, o sistema desenvolvido e implementado é capaz de adquirir imagens recorrendo a um sensor linear, transmitir essa imagem via Ethernet e processar essa imagem extraíndo elementos quantitativos dessa análise. É usado para distinguir, analisar e classificar defeitos existentes nas superfícies de rolhas de cortiça natural, embora a sua utilização em outros processos possa ser facilmente adaptada.

Foi também realizado um estudo da variância estatística dos resultados. Esta análise serve para validar a metodologia proposta e abre as portas a trabalhos futuros.

## Abstract

In the last decades, the appearance of photosensitive semiconductors, allied to the ever increasing processing capacity available, allowed the development of tools capable of substituting people in dangerous, repetitive or demeaning tasks.

This dissertation begins with a description of the hardware, namely, the photosensitive elements, conditioning and conversion modules and the ethernet communication system.

Then, it presents the developed software for the image acquisition and processing. The processing algorithms include morphologic manipulation, convolution, binarization and clustering.

It is presented a system that is able to acquire images by means of a linear photo sensor, transmit that image over an Ethernet Network and process that image to extract quantitative elements from that analysis. The implemented system can analyze and distinguish defects present on the surface of a cork. It is possible, also, to adapt the system to other kind of problems.

It was also performed a study of the statistical variance of the results. This serves to validate the proposed methodology and opens doors to future work.

# Índice

Índice de Figuras.....	10
Índice de Gráficos.....	15
Índice de Tabelas.....	16
Índice de Diagramas.....	17
1 Introdução.....	18
1.1 Contexto e Motivação.....	18
1.2 Objectivos e Contribuições.....	19
1.3 Estrutura da Tese.....	19
2 Definição do problema.....	20
3 Sensor de Imagem CCD.....	21
3.1 História do CCD.....	21
3.2 Tensão como função da intensidade luminosa.....	21
3.3 Tempo de exposição.....	22
3.4 CCD lineares versus CCD de área.....	23
3.5 CMOS versus CCD.....	24
3.6 Uso de CCDs.....	25
3.6.1 Medida de objectos.....	25
3.7 Aplicação prática de CCDs.....	26
4 Óptica.....	27
4.1 Projecção.....	27
4.1.1 Distância focal de uma lente convergente.....	27
4.1.2 Distância focal de uma lente divergente.....	28
4.1.3 Imagem projectada.....	29
4.1.4 Ponto de intersecção.....	29
4.2 Degradação da imagem.....	31
4.2.1 Aberração Cromática.....	31
4.2.2 Aberração Monocromática.....	33
4.2.3 Distorção em Barril.....	33
4.3 Iluminação.....	35
4.3.1 Quantidade de Luz.....	35
4.3.2 Incidência.....	36
4.3.3 Tipo de fonte luminosa.....	36
4.4 Aplicação prática.....	37
4.4.1 Projecção da imagem.....	37
4.4.2 Distorção em barril.....	38
4.4.3 Iluminação.....	40
5 Rede Ethernet.....	41
5.1 Modelo de Referência OSI.....	41
5.2 Modelo TCP/IP ou UDP/IP.....	42
5.2.1 Camada física.....	44
5.2.2 Camada de Rede (Network Layer).....	44
5.2.3 Camada de Transporte (Transport Layer).....	45
5.2.3.1 TCP.....	45
5.2.3.2 UDP.....	45
5.3 Aplicação Prática.....	46

5.4 Resultados Práticos.....	47
5.5 Projectos Futuros – Múltipla aquisição.....	48
6 Hardware.....	50
6.1 Câmara CCD Linear.....	51
6.1.1 Desenvolvimento da câmara de CCD.....	52
6.2 Condicionamento e conversão de sinal.....	52
6.2.1 Calibração do adaptador de tensões.....	55
6.2.2 Ethernet.....	55
6.3 Chamadas ao sistema “ethernet”.....	55
6.4 Controlador do CCD.....	56
6.5 Controlador de rede Ethernet.....	58
6.6 Resultados práticos do Hardware.....	59
7 Pré-processamento de Imagem Digital.....	61
7.1 Delimitações da imagem a processar.....	61
7.1.1 Detecção dos limites horizontais.....	62
7.1.1.1 Aplicação prática da detecção dos limites horizontais.....	63
7.1.2 Detecção de uma rotação completa da rolha (limites verticais).....	64
7.1.2.1 Aplicação prática da detecção de uma rotação completa da rolha.....	64
7.2 Histograma de tons cinzentos.....	66
7.2.1 Histogramas de imagens adquiridas.....	67
7.3 Correção de variações de luminosidade (enriquecimento de contraste).....	68
7.3.1 Aplicação prática da correção de luminosidade.....	71
8 Processamento de Imagem Digital.....	74
8.1 Algoritmos de detecção de orlas.....	74
8.1.1 Respostas impulsiais típicas para a convolução 2-D.....	75
8.1.1.1 Resultados práticos de respostas impulsiais típicas.....	78
8.2 Binarização (thresholding).....	81
8.2.1 Aplicação da Binarização.....	82
8.2.2 Resultados da Binarização.....	83
8.3 Processamento Morfológico de Imagem Digital.....	85
8.3.1 Erosão e Dilatação.....	85
8.3.2 Abertura e Fecho.....	86
8.3.3 Resultados práticos – Erosão e Dilatação.....	87
8.3.4 Resultados práticos – Abertura e Fecho.....	89
8.4 Resolução de tons de cinzento.....	91
8.4.1 Resultados da escolha da resolução de tons.....	92
8.5 Detecção de manchas/defeitos na imagem.....	94
8.5.1 Algoritmo.....	95
8.5.2 Resultados do algoritmo detecção de defeitos.....	98
8.6 Aplicação do algoritmo de detecção de defeitos/manchas.....	99
8.6.1 Erosão.....	100
8.6.2 Dilatação.....	100
8.6.3 Abertura.....	101
8.6.4 Fecho.....	102
8.6.5 Filtros lineares:convolução e detecção de orlas.....	103
9 Aplicação do Processamento de imagem digital.....	105
9.1 Precisão das medidas adquiridas.....	105

---

9.1.1 Resultados da aquisição de medidas.....	106
9.2 Resultados da distribuição directa das classes.....	107
9.3 Resultados da distribuição das classes após processamento.....	109
9.4 Fiabilidade de resultados – Estudo estatístico de amostras.....	112
9.4.1 Teste 1.....	113
9.4.2 Teste 2.....	115
9.4.3 Teste 3.....	117
9.4.4 Conclusões.....	118
9.5 Processamento em tempo real.....	119
10 Conclusões.....	120
10.1 Trabalho desenvolvido.....	120
10.2 Trabalho futuro.....	120
Bibliografia.....	122
Anexo A – Esquema eléctrico da câmara CCD.....	124
Anexo B – Esquema eléctrico do condicionamento de sinal.....	125

## Índice de Figuras

Figura 3.1 CCD linear.....	21
Figura 3.2 Medida de objecto com feixes paralelos.....	25
Figura 3.3 Medida de objecto com fonte de luz pontual.....	25
Figura 3.4 Saída do sensor na medida de um objecto.....	26
Figura 4.1 Distância focal de uma lente convergente.....	28
Figura 4.2 Distância focal de uma lente divergente.....	28
Figura 4.3 Imagem Projectada.....	29
Figura 4.4 Imagem Projectada.....	29
Figura 4.5 Cálculo do ponto de intersecção.....	30
Figura 4.6 Aberração cromática.....	32
Figura 4.7 Aberração cromática.....	32
Figura 4.8 Correção de aberração cromática.....	32
Figura 4.9 Aberração monocromática.....	33
Figura 4.10 Distorção em barril.....	34
Figura 4.11 Mapeamento Mundo-Pixel.....	34
Figura 4.12 Distorção em barril associado a um CCD linear.....	35
Figura 4.13 Iluminação de um objecto com uma fonte luminosa.....	36
Figura 4.14 Iluminação de um objecto com fonte luminosa dupla.....	36
Figura 4.15 Diâmetro de uma rolha.....	37
Figura 4.16 Imagem adquirida com um padrão de linhas paralelas.....	39
Figura 5.1 Modelo OSI - 7 Camadas.....	42
Figura 5.2 Modelo TCP/IP.....	43
Figura 5.3 Exemplo de Camadas da rede Ethernet segundo Modelo TCP/IP.....	43
Figura 5.4 Configuração da rede Ethernet.....	47
Figura 5.5 Aquisição múltipla com Hub.....	48
Figura 5.6 Múltipla aquisição com Switch.....	49
Figura 5.7 Múltipla aquisição com várias cartas de rede Ethernet.....	49
Figura 6.1 Sistema câmara-controlador-PC.....	50
Figura 6.2 Saída do CCD sem sample & hold.....	51
Figura 6.3 Saída do CCD com sample & hold.....	51
Figura 6.4 Esquema eléctrico da câmara CCD.....	52
Figura 6.5 Níveis de tensão de saída do CCD.....	53
Figura 6.6 Adaptador de tensões: CCD -> A/D.....	53
Figura 6.7 Fotografia de uma rolha.....	59
Figura 6.8 Imagem captada de 256x256 pixeis com 256 tons de cinzento.....	59
Figura 7.1 Imagem captada de 256x256 pixeis com 256 tons de cinzento.....	62
Figura 7.2 Detecção dos limites horizontais.....	63
Figura 7.3 Detecção de uma rotação completa da rolha com uma velocidade elevada.....	65
Figura 7.4 Detecção de uma rotação completa da rolha com uma velocidade baixa.....	66
Figura 7.5 Dimensão final da imagem para processamento.....	66
Figura 7.6 Histograma da Figura 7.7.....	67
Figura 7.7 Imagem adquirida com boa luminosidade.....	67
Figura 7.8 Histograma da Figura 7.9.....	68
Figura 7.9 Imagem adquirida com luz insuficiente.....	68
Figura 7.10 Imagem da superfície de rolha adquirida.....	69

Figura 7.11 Histograma.....	69
Figura 7.12 Imagem com tons invertidos.....	69
Figura 7.13 Histograma.....	69
Figura 7.14 Mapa de intensidade "Cópia" .....	70
Figura 7.15 Mapa de intensidade "Inversão de brilho" .....	70
Figura 7.16 Mapa de Intensidade "Ajuste de brilho" .....	70
Figura 7.17 Cálculo da recta de ajuste de contraste.....	70
Figura 7.18 Histograma da Figura 7.19.....	72
Figura 7.19 Imagem adquirida com fraca luminosidade.....	72
Figura 7.20 Histograma da Figura 7.21.....	72
Figura 7.21 Resultado do enriquecimento de contraste da Figura 7.19.....	72
Figura 7.22 Histograma da Figura 7.23.....	73
Figura 7.23 Imagem gerada aleatoriamente com tons entre 80 e 180.....	73
Figura 7.24 Histograma da Figura 7.25.....	73
Figura 7.25 Resultado do enriquecimento de contraste da Figura 7.23.....	73
Figura 8.1 Convolução 2-D.....	75
Figura 8.2 Imagem de teste.....	78
Figura 8.3 Imagem de teste.....	78
Figura 8.4 Aplicação da convolução à Equação 8.4.....	78
Figura 8.5 Aplicação da convolução à Equação 8.4.....	78
Figura 8.6 Convolução Prewitt.....	79
Figura 8.7 Convolução Prewitt.....	79
Figura 8.8 Convolução Sobel.....	79
Figura 8.9 Convolução Sobel.....	79
Figura 8.10 Convolução Prewitt.....	80
Figura 8.11 Convolução Prewitt.....	80
Figura 8.12 Convolução Sobel.....	80
Figura 8.13 Convolução Sobel.....	80
Figura 8.14 Laplaciana da Figura 8.2.....	80
Figura 8.15 Laplaciana da Figura 8.3.....	80
Figura 8.16 Convolução Laplaciana.....	81
Figura 8.17 Convolução Laplaciana.....	81
Figura 8.18 Histograma.....	82
Figura 8.19 Imagem de teste.....	83
Figura 8.20 Histograma.....	83
Figura 8.21 Binarização.....	83
Figura 8.22 Imagem de teste (a 80% de luz).....	83
Figura 8.23 Histograma.....	83
Figura 8.24 Binarização.....	83
Figura 8.25 Imagem de teste (redução de luz + enriquecimento).....	83
Figura 8.26 Histograma.....	83
Figura 8.27 Binarização.....	83
Figura 8.28 Imagem de teste.....	87
Figura 8.29 Histograma.....	87
Figura 8.30 Imagem de teste.....	87
Figura 8.31 Histograma.....	87
Figura 8.32 Erosão.....	87

Figura 8.33 Histograma.....	87
Figura 8.34 Dilatação.....	87
Figura 8.35 Histograma.....	87
Figura 8.36 Erosão.....	87
Figura 8.37 Histograma.....	87
Figura 8.38 Dilatação.....	87
Figura 8.39 Histograma.....	87
Figura 8.40 Imagem preto e branco de teste.....	88
Figura 8.41 Imagem Preto e Branco após Erosão.....	88
Figura 8.42 Imagem Preto e Branco após Dilatação.....	88
Figura 8.43 Imagem processada: Abertura.....	89
Figura 8.44 Imagem processada: Fecho.....	89
Figura 8.45 Imagem processada: Abertura.....	89
Figura 8.46 Imagem processada: Fecho.....	89
Figura 8.47 Imagem processada: Abertura.....	90
Figura 8.48 Imagem processada: Fecho.....	90
Figura 8.49 Imagem de teste para Abertura.....	90
Figura 8.50 Resultado da Abertura.....	90
Figura 8.51 Imagem de teste ao algoritmo Fecho.....	91
Figura 8.52 Resultado do algoritmo Fecho.....	91
Figura 8.53 Imagem de 8 bits (256 tons).....	92
Figura 8.54 Imagem com os 4 bits mais significativos (16 tons).....	92
Figura 8.55 Imagem original.....	93
Figura 8.56 Bit 0.....	93
Figura 8.57 Bit 1.....	93
Figura 8.58 Bit 2.....	93
Figura 8.59 Bit 3.....	93
Figura 8.60 Bit 4.....	93
Figura 8.61 Bit 5.....	93
Figura 8.62 Bit 6.....	93
Figura 8.63 Bit 7.....	93
Figura 8.64 Exemplo: Tecido de couro defeituoso.....	94
Figura 8.65 Detecção de defeitos.....	94
Figura 8.66 Posicionamento do corte fora dos defeitos.....	95
Figura 8.67 Memória necessária para algoritmo detecção defeitos.....	96
Figura 8.68 Imagem de teste.....	98
Figura 8.69 Imagem de teste - binarização.....	98
Figura 8.70 Resultado do algoritmo.....	98
Figura 8.71 Imagem de teste.....	99
Figura 8.72 Resultado do algoritmo.....	99
Figura 8.73 Resultado algébrico.....	99
Figura 8.74 Imagem de teste.....	99
Figura 8.75 Resultado do algoritmo.....	99
Figura 8.76 Resultado algébrico.....	99
Figura 8.77 Imagem de teste.....	99
Figura 8.78 Resultado do algoritmo.....	99
Figura 8.79 Resultado algébrico.....	99

Figura 8.80 Imagem de teste.....	99
Figura 8.81 Resultado do algoritmo.....	99
Figura 8.82 Resultado algébrico.....	99
Figura 8.83 Imagem original.....	100
Figura 8.84 Detecção de defeitos (88 defeitos encontrados).....	100
Figura 8.85 Erosão da imagem original.....	100
Figura 8.86 Detecção de defeitos da erosão (17 defeitos encontrados).....	100
Figura 8.87 Imagem original.....	100
Figura 8.88 Detecção de defeitos (239 defeitos encontrados).....	100
Figura 8.89 Erosão da imagem original.....	100
Figura 8.90 Detecção de defeitos da erosão (1 defeito encontrado).....	100
Figura 8.91 Imagem original.....	101
Figura 8.92 Detecção de defeitos (23 defeitos encontrados).....	101
Figura 8.93 Dilatação da imagem original.....	101
Figura 8.94 Detecção de defeitos da dilatação (21 defeitos encontrados).....	101
Figura 8.95 Imagem original.....	101
Figura 8.96 Detecção de defeitos (39 defeitos encontrados).....	101
Figura 8.97 Dilatação da imagem original.....	101
Figura 8.98 Detecção de defeitos da dilatação (1 defeito encontrado).....	101
Figura 8.99 Imagem original.....	102
Figura 8.100 Detecção de defeitos (224 defeitos encontrados).....	102
Figura 8.101 Abertura da imagem original.....	102
Figura 8.102 Detecção de defeitos na abertura (2 defeitos encontrados).....	102
Figura 8.103 Imagem original.....	102
Figura 8.104 Detecção de defeitos (2 defeitos encontrados).....	102
Figura 8.105 Fecho da imagem original.....	102
Figura 8.106 Detecção de defeitos no fecho (1 defeito encontrado).....	102
Figura 8.107 Imagem de teste.....	103
Figura 8.108 Detecção de defeitos.....	103
Figura 8.109 Convolução (Prewitt-linhas).....	104
Figura 8.110 Inversão dos tons.....	104
Figura 8.111 Detecção de defeitos.....	104
Figura 8.112 Convolução (Prewitt-colunas).....	104
Figura 8.113 Inversão de tons.....	104
Figura 8.114 Detecção de defeitos.....	104
Figura 9.1 Imagem de teste (alta velocidade).....	107
Figura 9.2 Imagem de teste (baixa velocidade).....	107
Figura 9.3 Imagem de teste (alta velocidade) delimitada (linha 45).....	107
Figura 9.4 Imagem de teste (baixa velocidade) delimitada (linha 70).....	107
Figura 9.5 Detecção de defeitos em pixels.....	107
Figura 9.6 Detecção de defeitos em milímetros.....	107
Figura 9.7 Detecção de defeitos em pixels.....	107
Figura 9.8 Detecção de defeitos em milímetros.....	107
Figura 9.9 Imagem a classificar.....	108
Figura 9.10 Resultados calculados.....	108
Figura 9.11 Imagem a classificar.....	108
Figura 9.12 Resultados calculados.....	108

---

Figura 9.13 Imagem de teste.....	109
Figura 9.14 Imagem de teste Dilatada.....	109
Figura 9.15 imagem de teste Dilatada Binarizada.....	109
Figura 9.16 Detecção de defeitos da Figura 9.14.....	109
Figura 9.17 Imagem de teste.....	110
Figura 9.18 Imagem de teste Fechada.....	110
Figura 9.19 Imagem de teste Fechada Binarizada.....	110
Figura 9.20 Detecção de defeitos da Figura 9.18.....	110
Figura 9.21 Imagem de teste.....	111
Figura 9.22 Imagem de teste com convolução pela Equação 9.1.....	111
Figura 9.23 Binarização da Figura 9.22.....	111
Figura 9.24 Detecção de defeitos da Figura 9.22.....	111
Figura 9.25 Rolha geradora de amostras – teste 1.....	113
Figura 9.26 Rolha geradora de amostras – teste 2.....	115
Figura 9.27 Rolha geradora de amostras – teste 3.....	117

## Índice de Gráficos

Gráfico 4.1 Mapeamento Mundo-pixel.....	40
Gráfico 7.1 Histograma da medida do comprimento.....	63
Gráfico 9.1 Histograma da área defeituosa - teste1.....	113
Gráfico 9.2 Histograma do defeito máximo - teste 1.....	113
Gráfico 9.3 Histograma da máxima fenda horizontal – teste 1.....	114
Gráfico 9.4 Histograma da máxima fenda vertical – teste 1.....	114
Gráfico 9.5 Histograma da área defeituosa – teste 2.....	115
Gráfico 9.6 Histograma do defeito máximo – teste 2.....	115
Gráfico 9.7 Histograma da máxima fenda horizontal - teste 2.....	116
Gráfico 9.8 Histograma da máxima fenda vertical – teste 2.....	116
Gráfico 9.9 Histograma da área defeituosa - teste 3.....	117
Gráfico 9.10 Histograma do defeito máximo – teste 3.....	117
Gráfico 9.11 Histograma da máxima fenda horizontal – teste 3.....	118
Gráfico 9.12 Histograma da máxima fenda vertical - teste3.....	118

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 Imagem de CCD matricial.....	23
Tabela 3.2 Imagem de um CCD linear.....	23
Tabela 4.1 Posição (pixel) das linhas da imagem.....	39
Tabela 6.1 Valores dos pixels .....	58
Tabela 8.1 Máscaras de Prewitt e Sobel (linhas e colunas).....	77
Tabela 8.2 Resultados dos defeitos encontrados.....	84
Tabela 9.1 Variação de medidas efectuadas em função da velocidade (-35%).....	106
Tabela 9.2 Exemplo de configuração de parâmetros.....	108
Tabela 9.3 Variação das dimensões dos defeitos com a Dilatação da imagem.....	110
Tabela 9.4 Variação das dimensões dos defeitos com o Fecho da imagem.....	110
Tabela 9.5 Variação das dimensões dos defeitos com a Convolução pela Equação 9.1.....	112

## Índice de Diagramas

Diagrama 6.1 Algoritmo do microcontrolador.....	57
Diagrama 7.1 Pré-processamento e processamento de imagem digital.....	61
Diagrama 8.1 Abertura e Fecho de uma imagem.....	86
Diagrama 8.2 Algoritmo da função "get_blob".....	97

# 1 Introdução

## 1.1 Contexto e Motivação

A visão artificial associada ao processamento de imagem digital é uma área muito importante na resolução de problemas presentes nas indústrias. Uma vez que hoje em dia os computadores possuem crescente capacidade de processamento, aliar estes à resolução de problemas relacionados com imagem é viável. Actualmente, o preço do equipamento pode ser baixo mesmo para um sistema robusto e o recurso a equipamento *standard* permite assim uma fácil substituição caso necessário.

Tipicamente, a visão artificial aplicada na indústria é dividida em duas vertentes: a inspecção, normalmente associada ao controlo de qualidade de produtos, essencial nos dias que correm, e a manipulação automática de objectos, também essencial em casos de ambientes perigosos, de fadiga física para os humanos, de trabalhos repetitivos que podem levar um humano a cometer erros ao fim de pouco tempo.

Para além do acréscimo da velocidade face a um humano, outra vantagem de um sistema automático de inspecção visual deve-se ao facto de poder ser independente de questões subjectivas, já que o próprio estado de espírito, o cansaço da pessoa ou até a variabilidade de critérios entre indivíduos. Há no entanto a questão que algumas situações triviais para um humano sejam muito complicadas de serem efectuadas por um equipamento electrónico. Por isso, o olho humano é em certos casos imprescindível e muitas vezes o facto de substituir o humano por uma máquina não significa desempregá-lo mas sim alocá-lo a outra tarefa. Assim a produção e a qualidade final poderão sofrer aumentos significativos.

## 1.2 Objectivos e Contribuições

O presente trabalho incide sobre a vertente de inspecção de imagens e forma assim uma ferramenta para aplicação em trabalhos futuros nesta área. As imagens adquiridas consistem em superfícies de rolhas naturais de cortiça. Tal pode ser considerado um mero exemplo, uma vez que o sistema pode ser adaptado a outros problemas. O hardware também fornece, por si, uma ferramenta de aquisição de imagem em tempo real que poderá ser usada noutras vertentes tais como aquisição de sinais genéricos via rede Ethernet.

A classificação de rolhas por classes hoje em dia não é padronizada, não sendo possível garantir ao cliente final uma qualidade independente do fornecedor. O desenvolvimento de equipamentos destinados à escolha automática de rolhas de cortiça natural começa, por si só, a obrigar ao aparecimento de padrões.

## 1.3 Estrutura da Tese

Genericamente, o presente documento está dividido em três grandes partes. A primeira, apresenta de uma forma detalhada todo o *hardware* utilizado e desenvolvido no projecto e está descrita nos Capítulos 3, 4 e 5 onde estão apresentados os aspectos importantes dos CCDs, de óptica e da rede ethernet, respectivamente. No Capítulo 6, apresenta-se de uma forma clara a interligação do hardware concluindo a primeira parte.

Na segunda parte, apresenta o *software* desenvolvido em *delphi*, e é constituída pelos Capítulos 7 e 8 onde se ilustram, respectivamente, o pré-processamento e o processamento de imagem digital.

Finalmente, na terceira parte constituída pelo Capítulo 9, estão descritos os resultados finais da aplicação em imagens de superfícies de rolhas de cortiça natural e na sua respectiva classificação qualitativa.

## 2 Definição do problema

As tarefas que apresentam uma natureza repetitiva são, sempre que possível, de evitar para o ser humano, uma vez que a concentração, capacidade de raciocínio e o interesse vão diminuindo, implicando assim um rendimento ou qualidade do trabalho produzido cada vez mais baixo. Atendendo ao grau de segurança, as tarefas que exigem algum risco, nomeadamente em ambientes perigosos, tóxicos, etc. devem também ser evitadas pelo ser humano que aí deve dar lugar às máquinas. É nas circunstâncias indicadas que a robótica e automação são úteis.

Na base do presente trabalho estão imagens de superfícies de rolhas de cortiça natural, embora não seja difícil a adaptação a aplicações noutras áreas. De facto, na maioria dos casos, as imagens apresentadas e processadas têm como origem em superfícies de rolhas de cortiça enquanto outras provém de desenhos especificamente criados para o teste e apresentação de algoritmos.

Concluído o processamento é possível, por exemplo, classificar qualitativamente uma rolha, atendendo aos defeitos existentes na sua superfície. Note-se que os tipos de defeitos influenciam de forma diferente a classe. Nomeadamente, defeitos concentrados e encostados aos topos ou defeitos em formas de linhas que atravessam toda a superfície de um topo ao outro, terão pior classificação do que defeito que possuam a mesma área mas distribuídos por toda a superfície da rolha.

## 3 Sensor de Imagem CCD

Um CCD (Charged Coupled Device) é uma memória electrónica que pode ser carregada pela luz. Os CCDs armazenam uma carga correspondente à intensidade luminosa incidente na sua zona sensível, o que os torna muito úteis em câmaras, scanners, fax, etc.

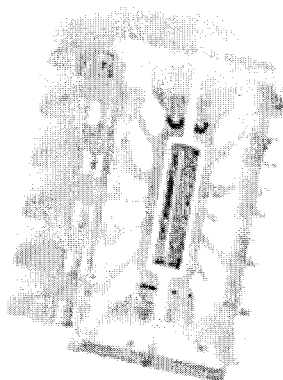


Figura 3.1 CCD linear

Devido à sua sensibilidade ter aumentado brutalmente, hoje em dia são largamente utilizados na astronomia e em veículos espaciais, como o telescópio Hubble [1].

### 3.1 História do CCD

*George Smith e Willard Boyle*, inventores dos CCDs nos laboratórios *Bell Labs (Lucent Technologies)* em 1969, receberam o primeiro prémio de descoberta do *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)* em 30 de Junho de 1999. Este prémio faz reconhecer um trabalho que teve um impacto importante na área da electrónica.

Hoje em dia, a *Lucent Technologies* tem cerca de 50 patentes na área dos CCDs [1].

### 3.2 Tensão como função da intensidade luminosa

Cada pixel funciona como uma pequena capacidade que armazena uma quantidade de energia dependente da intensidade luminosa e do tempo de incidência desta (tempo de exposição:  $t_f - t_i$ ).

A energia  $E$  armazenada no pixel  $i$  pode ser escrita como:

$$E[i] = k_1 \cdot \int_{t_i}^{t_f} L(t) dt \quad (3.1)$$

onde  $L(t)$  é a intensidade luminosa.  $E[i]$  será uma função crescente, uma vez que não é possível  $L(t)$  negativos. Como a tensão  $V_o(i)$  de cada pixel é função da energia  $E(i)$ , vem para cada pixel  $i$ ;

$$V_o[i] = k_2 \cdot \int_{t_i}^{t_f} L(t) dt \quad (3.2)$$

A função  $V_o(i)$  será também crescente, o que acarreta a saturação do dispositivo electrónico em causa. Para evitar este efeito indesejado, deve-se ter em atenção aos limites de integração (tempo de exposição:  $t_f - t_i$ ). No final de cada linha, as capacidades de todos os pixels são descarregadas, ficando assim prontas para nova exposição.

Outro facto importante implica que em cada ciclo deverão ser descarregados todos os pixels sob pena de se obter saturação nos ciclos seguintes, uma vez que a energia se vai acumulando sempre que a luz está a incidir sobre a superfície deste componente.

Para um CCD genérico ( $n$  pixels) são necessários obrigatoriamente mais impulsos de varrimento do que os simples  $n$ . Este facto permite diminuir o ruído; o circuito integrado não está isento de radiações, por isso são colocados cerca de 20 pixels, ocultos da luz, anteriores e posteriores aos visíveis e declarados ( $n$ ). Estes pixels (*dummy*) estão também sujeitos às radiações. A saída é a relação (diferença) entre os *dummy* pixels e os de sinal (luz incidente), permitindo assim uma maior imunidade ao ruído. O sinal de fim de linha (normalmente designado por  $\phi_{ROG}$ ) permite controlar o *tempo de exposição* ( $t_f - t_i$ ) de cada linha à luz incidente.

### 3.3 Tempo de exposição

À semelhança de uma máquina fotográfica, em que o tempo incidente da imagem projectada na película implicará que esta fique mais ou menos *queimada*, também num sensor electrónico existe o tempo de exposição da imagem. No caso de um CCD linear, o tempo necessário para efectuar uma leitura completa da linha denomina-se *tempo de exposição*. Se este aumentar implicará ao sensor estar mais tempo com a imagem a incidir, o que levará no final à

leitura de uma imagem mais clara, podendo inclusive saturar e vice-versa. Nos casos em que se pretendem obter imagens de movimento, obrigatoriamente têm que se utilizar tempos de exposição baixos, sob pena de obter arrastamento<sup>2</sup>.

### 3.4 CCD lineares versus CCD de área

Existem CCDs de área, em que a imagem adquirida toma a forma de uma matriz de  $n$  linhas por  $m$  colunas como indicado na Tabela 3.1, enquanto que nos CCDs lineares a imagem adquirida toma a forma de um vector de  $m$  elementos como indicado na Tabela 3.2.

$Pix[1,1]$	$Pix[1,2]$	...	$Pix[1,m-1]$	$Pix[1,m]$
$Pix[2,1]$	$Pix[2,2]$	...	$Pix[2,m-1]$	$Pix[2,m]$
...	...	...	...	...
$Pix[n-1,1]$	$Pix[n-1,2]$	...	$Pix[n-1,m-1]$	$Pix[n-1,m]$
$Pix[n,1]$	$Pix[n,2]$	...	$Pix[n,m-1]$	$Pix[n,m]$

Tabela 3.1 Imagem de CCD matricial

$Pix[1]$	$Pix[2]$	...	$Pix[m-1]$	$Pix[m]$
----------	----------	-----	------------	----------

Tabela 3.2 Imagem de um CCD linear

A escolha do tipo de CCD a usar depende, essencialmente, da finalidade do projecto. Muitas empresas da especialidade dedicam-se ao fabrico de CCDs lineares, tais como a Kodak™, Fairchild™, Toshiba™, Matsushita™, Thomsom™, Philips™ e Sony™, entre outros, que fornecem ao utilizador uma vasta gama de componentes. As vantagens da escolha de CCDs lineares são por exemplo [2]:

- menor susceptibilidade a ruído electrónico uma vez que necessitam de menos sinais de *clock*, portanto o sinal de vídeo está melhor isolado destes sinais de relógio.
- possuem a frequência de varrimento ajustável enquanto que os CCDs de área estão normalmente ligados a frequências *standard* obrigando a ter um controlo de luz mais apertado nomeadamente “*strobes*” para se obter um controlo do tempo de integração.
- aceitam frequências de varrimento mais elevadas.
- possuem normalmente tempos de ciclo menores que os de área, sendo necessário elevar a

<sup>2</sup> Efeito produzido quando uma fotografia é disparada enquanto a máquina ou o objecto se encontram a mover com uma velocidade superior ao tempo de exposição obtendo-se a sensação de “tremido”

iluminação conseguindo um melhor rácio sinal/ruído.

- possuem normalmente a dimensão dos pixeis menores permitindo assim maior resolução.
- podem ter elevados números de pixeis (até ordem de 14.000 pixeis) enquanto que um CCD de área é praticamente impensável ter mais de 4.000 por 4.000.

Segundo o último factor, o uso de um CCD linear permite obter uma maior resolução de imagem, por isso, e sempre que possível, deve-se optar por colocar uma imagem a deslocar-se e a adquiri-la com um CCD linear, caso se pretenda efectuar uma aquisição com elevada precisão. Existem ainda outros processos que se tornariam mais complicados e demorados para adquirir imagens se fossem usados CCDs de área, tais como a leitura de objectos num tapete transportador, rolhas, ou qualquer corpo cilíndrico de dimensões relativamente reduzidas. Neste caso, deslocar a imagem e adquirir várias linhas torna-se mais simples do que usar uma câmara matricial.

Por outro lado, normalmente o uso de um CCD matricial requer o armazenamento, manipulação e processamento de uma quantidade de informação apreciável, que normalmente não é conseguida com um microcontrolador. Assim, tipicamente o uso de um microcontrolador é associado a um CCD linear cuja informação pode ser processada internamente, embora com algumas limitações.

### 3.5 CMOS versus CCD

Existem dois tipos de sensores de aquisição de imagem, concorrentes entre si. Aqui ambos têm vantagens e desvantagens. Assim sendo, sensores CMOS possuem uma menor resolução que os CCDs e até agora menos qualidade de imagem. Por outro lado, não possuem o efeito de “*blooming*”<sup>3</sup> ou *bleeding*, poderão possuir processamento interno (conversores A/D internos, com controlo automático de ganho), acesso aleatório aos pixeis ao contrário dos CCD que possuem um acesso sequencial. Este facto deve-se à forma com que são produzidos ambos os componentes. Assim, a tecnologia com que os CMOS são produzidos é a mesma com que são produzidos os circuitos integrados, podendo ser adicionada uma camada de “processamento”. Por outro lado, os CCDs são produzidos de uma forma que apenas se contenham elementos sensíveis à luz, impossibilitando assim a tecnologia de incluir transistores dedicados ao processamento.

---

<sup>3</sup> O facto de saturar um pixel origina a saturação dos pixeis vizinhos, alastrando-se a saturação pela imagem.

Os CMOS podem incluir uma conversão logarítmica interna da energia luminosa para tensão, permitindo assim uma função de transferência linear [2].

### 3.6 Uso de CCDs

Os CCDs lineares podem ser utilizados, essencialmente, em duas aplicações.

A primeira, medida de objectos, consiste em aplicar a área sensível de um CCD exposto directamente ao objecto, convenientemente iluminado, de forma apenas a medi-lo e não adquirir a sua imagem.

A segunda consiste em projectar a imagem de um objecto, através de lentes, de forma a adquirir a imagem do objecto.

#### 3.6.1 Medida de objectos

No caso em estudo não é pretendido medir a dimensão de um objecto mas sim adquirir a imagem e processá-la. No caso de se pretender medir objectos de pequenas dimensões face ao tamanho do CCD, poderá ser usado outro processo em vez de ser projectada a imagem no CCD. Assim, o objecto é colocado entre a fonte luminosa e o CCD. Neste caso, o mais simples, teoricamente, é utilizar uma fonte de luz com feixes paralelos, como indicado na Figura 3.2. Por outro lado, um processo mais simples de realizar na prática seria utilizar uma fonte luminosa normal e conhecer a distância do objecto ao sensor, como indicado na Figura 3.3.

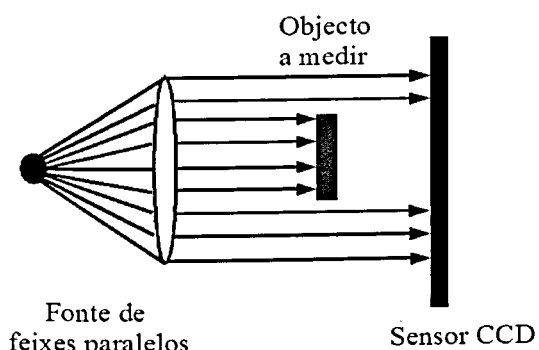


Figura 3.2 Medida de objecto com feixes paralelos

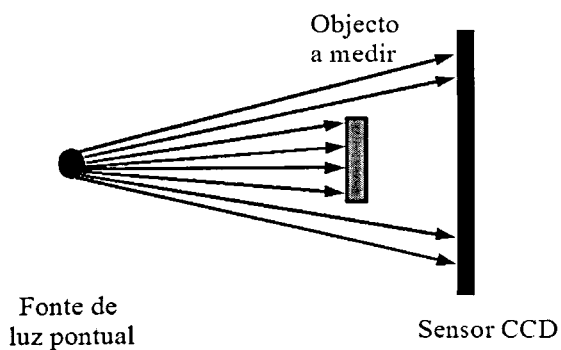
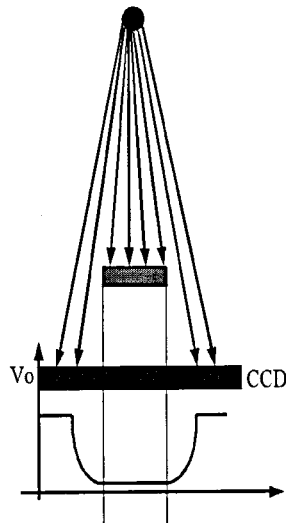


Figura 3.3 Medida de objecto com fonte de luz pontual

Nestes casos, o nível de iluminação terá que ser comparado com um *threshold*, como indicado na Figura 3.4. Este tipo de medida é, obviamente, mais susceptível a erros.

Deve-se ter atenção à quantidade de luz incidente no sensor CCD de modo a não provocar a saturação, uma vez que este se encontra directamente exposto à luz. Uma das soluções poderá ser um filtro de luz que permite atenuar a intensidade luminosa captada pelo sensor [3].



*Figura 3.4 Saída do sensor na medida de um objecto*

### 3.7 Aplicação prática de CCDs

O manuseamento de um CCD requer, por norma, um cuidado muito especial em relação à electrostática, uma vez que estes componentes apresentam uma sensibilidade elevada a este fenómeno natural, e podem-se facilmente danificar. Logo, o fabricante adverte o manuseamento deste componente com as devidas precauções e protecções.

Outro problema existente no desenvolvimento de sistemas de aquisição de imagem implica um rigor na posição dos componentes. Assim, a posição e distância do CCD em relação à lente (objectiva) torna-se crucial. O desvio de uma distância mínima (décimas de milímetro) origina uma imagem final desfocada. Na montagem destes sistemas ópticos, o rigor, a precisão e até a “higiene” são fundamentais. Note-se que um grão de poeira colocada na superfície do CCD, na área sensível à imagem deste, colocará alguns pixeis insensíveis à luz.

## 4 Óptica

Uma vez conhecido o princípio de funcionamento das lentes, torna-se possível projectar imagens numa superfície sensível à luz. Esta superfície poderá ser desde películas fotográficas que queimam com a intensidade luminosa como sensores electrónicos sensíveis à luz, transformando a intensidade luminosa incidente em cada ponto numa grandeza eléctrica (CCD, por exemplo).

O uso de sistemas ópticos acarretam efeitos por vezes indesejados. O interesse dos sistemas ópticos (lentes, objectivas,...) será o de produzirem a projecção, mas associado a este fenómeno está a degradação da imagem. Esta degradação é devida à difracção, à aberracção [4], e à distorção em barril da lente.

### 4.1 Projecção

A projecção será uma imagem rodada de  $180^\circ$  (invertida em relação ao sistema de coordenadas). Apenas se poderá obter uma imagem projectada a partir de uma lente convergente. Nas máquinas fotográficas o uso de uma objectiva faz substituir uma lente de forma a minimizar a degradação da imagem. Para além deste factor importantíssimo, existe ainda necessidade de controlar a quantidade de luz que flui através desta. O uso de um diafragma faz reduzir ou aumentar o tamanho da lente, fazendo diminuir ou aumentar respectivamente o ganho da lente em luz. Assim, a imagem projectada poderá ter maior ou menor luz incidente, embora a imagem seja sempre a mesma.

#### 4.1.1 Distância focal de uma lente convergente

Supondo que os raios de luz chegam à lente perpendiculares e que são paralelos entre eles, a distância focal é a medida, normalmente em milímetros, desde o centro da lente (virtual se for uma objectiva) até ao ponto onde todos os raios convergem. Este ponto está representado na Figura 4.1. A imagem projectada estará sempre a distâncias superiores a  $D_f$ .

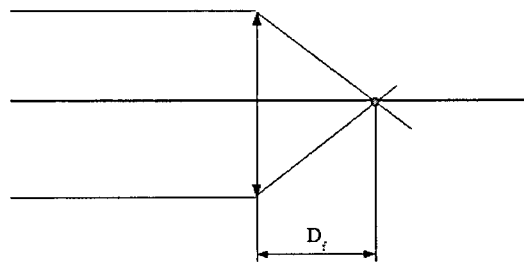


Figura 4.1 Distância focal de uma lente convergente

#### 4.1.2 Distância focal de uma lente divergente

Este tipo de lente não produz nenhuma imagem projectada, uma vez que os raios de luz paralelos não se encontram em qualquer ponto do plano. A distância focal encontra-se

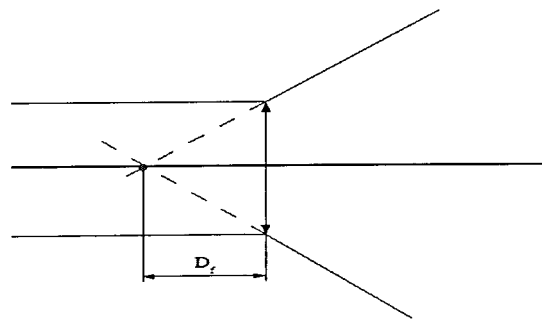


Figura 4.2 Distância focal de uma lente divergente

prolongando os raios de luz para o lado de onde são originados. Assim sendo, a distância focal será negativa (tal como as lentes usadas em óculos de correcção de miopia). Este ponto encontra-se representado na Figura 4.2.

### 4.1.3 Imagem projectada

Utilizando uma lente convergente, ou uma objectiva, um objecto pode ser projectado invertido numa tela a uma determinada distância.

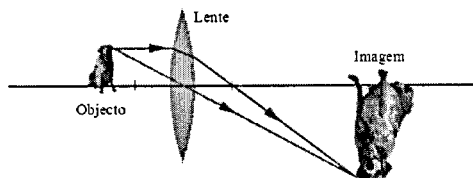


Figura 4.3 Imagem Projectada

O cálculo da posição e da dimensão da imagem projectada poderá ser efectuado através da intersecção de duas rectas. Uma vez que a recta que intercepta o eixo da lente não é alterada e que a recta perpendicular ao eixo terá que passar pelo ponto  $D_f$ , então a imagem projectada encontrar-se-á nesta intersecção, como indica a Figura 4.4.

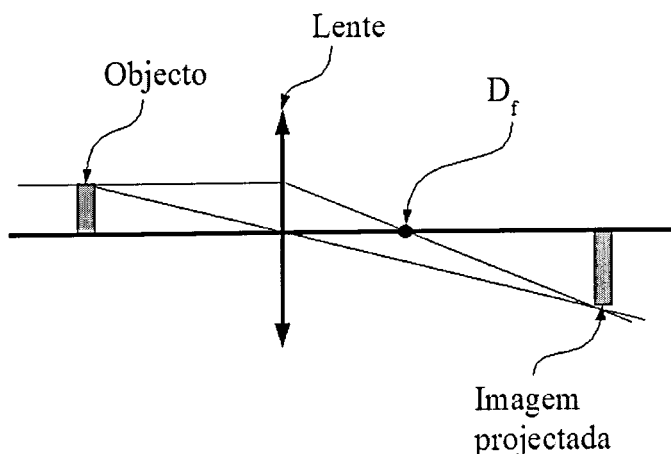


Figura 4.4 Imagem Projectada

### 4.1.4 Ponto de intersecção

Conhecendo a altura do objecto ( $H_{obj}$ ) e a sua distância à lente ( $D_{obj}$ ), a partir da distância focal ( $D_f$ ) é possível determinar a distância a que a imagem se irá formar ( $D_{img}$ ), assim como a altura da imagem projectada ( $H_{img}$ ).

Escrevendo as equações das rectas através de dois pontos conhecidos:

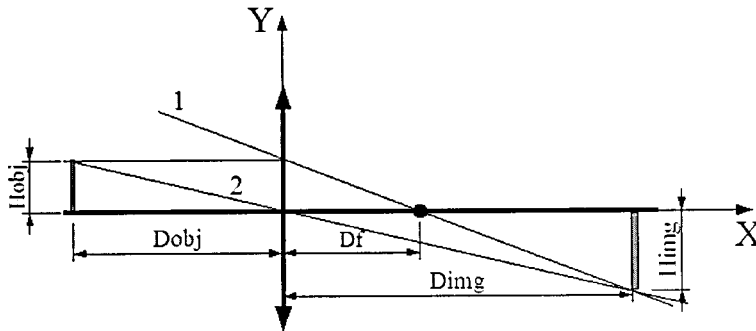


Figura 4.5 Cálculo do ponto de interseção

$$y_1 = -\frac{H_{obj}}{D_f} \cdot x + H_{obj} \quad ; \quad y_2 = -\frac{H_{obj}}{D_{obj}} \cdot x \quad (4.1)$$

A intersecção das duas rectas será a distância ( $D_{img}$ ) a que a imagem é projectada, segundo o eixo dos xx, e a sua respectiva altura ( $H_{img}$ ), segundo o eixo dos yy.

$$-\frac{H_{obj}}{D_f} \cdot x + H_{obj} = -\frac{H_{obj}}{D_{obj}} \cdot x \quad (=) \quad (4.2)$$

$$-\frac{1}{D_f} \cdot x + 1 = -\frac{1}{D_{obj}} \cdot x \quad (=) \quad (4.3)$$

$$x \cdot \left(-\frac{1}{D_{obj}} + \frac{1}{D_f}\right) = 1 \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{D_f} - \frac{1}{D_{obj}} \quad \forall D_{obj} > D_f \quad (4.5)$$

Uma outra forma de representar será:

$$x = \frac{D_{obj} \cdot D_f}{D_{obj} - D_f} \quad \forall D_{obj} > D_f \quad (4.6)$$

Ou seja, a distância entre a lente e a imagem projectada ( $D_{img}$ ) poderá ser calculada como indicado

na Equação 4.7.

$$D_{img} = \frac{D_{obj} \cdot D_f}{D_{obj} - D_f} \quad \forall D_{obj} > D_f \quad (4.7)$$

ou

$$\frac{1}{D_{img}} = \frac{1}{D_f} - \frac{1}{D_{obj}} \quad \forall D_{obj} > D_f \quad (4.8)$$

O cálculo da altura da imagem projectada ( $H_{img}$ ) será o ponto de uma recta (1 ou 2) para  $x = D_{img}$ .

Tomando a equação da recta 2 vem,

$$H_{img} = -\frac{H_{obj}}{D_{obj}} \cdot \frac{D_{obj} \cdot D_f}{D_{obj} - D_f} \quad \forall D_{obj} > D_f \quad (4.9)$$

Logo a altura da imagem projectada é calculada pela Equação 4.10.

$$H_{img} = -\frac{H_{obj} \cdot D_f}{D_{obj} - D_f} \quad \forall D_{obj} > D_f \quad (4.10)$$

## 4.2 Degradação da imagem

### 4.2.1 Aberração Cromática

O funcionamento de uma lente baseia-se na mudança de direcção que a luz sofre quando incide sobre a superfície de delimitação entre dois meios com diferentes índices de refração.

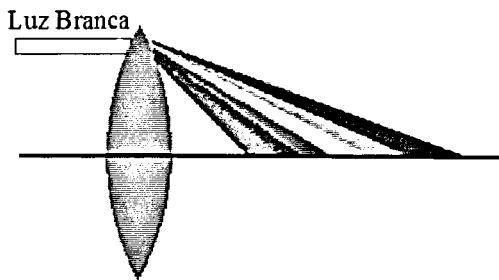


Figura 4.6 Aberração cromática

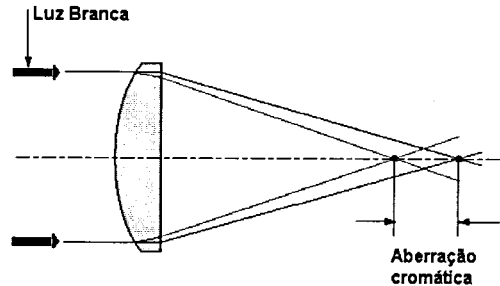


Figura 4.7 Aberração cromática

Este desvio depende do comprimento de onda da luz incidente. Se esta é branca, isto é, composta de todos os comprimentos de onda do espectro visível, as diversas radiações focam-se em pontos diferentes. A luz violeta é mais refractada e focada num ponto mais próximo da lente que as outras cores. O vermelho é a cor menos refractada; logo o foco dos raios desta cor é mais distante da lente. A esta diferença das distâncias dos focos de luz de cores diferentes chama-se *aberração cromática* e na prática dá origem a imagens com uma orla colorida em torno dos objectos. Esta aberração apresenta uma intensidade que varia de acordo com o grau de curvatura da lente e o índice de refração do vidro com que ela é feita.

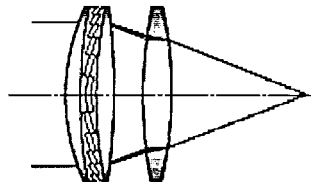


Figura 4.8 Correção de aberração cromática

Uma forma de solucionar este problema foi encontrada pelo oculista inglês *John Dollond* (1706 - 1761), que descobriu ser possível eliminar a orla colorida através de uma combinação de lentes. Uma lente biconvexa de vidro óptico, usada juntamente com uma lente adequada composta com uma elevada quantidade de óxido de chumbo, corrige a aberração cromática. Esta combinação é chamada lente acromática (sem cor). Estas lentes são hoje usadas nas objectivas das câmaras fotográficas e cinematográficas, microscópios, telescópios e numerosos outros instrumentos ópticos de alta qualidade. Para trabalhos fotográficos de elevado índice de qualidade, a correção acromática é realizada com lentes compostas que utilizam três ou mais tipos de vidro, constituindo as objectivas chamadas *apocromáticas*, popularmente conhecidas como "processadas". Elas são fundamentalmente indispensáveis para os trabalhos

fotográficos ou cinematográficos a cores [5].

### 4.2.2 Aberração Monocromática

Imagine-se um conjunto de raios de luz coerente<sup>4</sup> e paralelos incidindo numa lente em que todos os pontos de incidência são perpendiculares à lente formando um plano perfeito de frente de ondas. A lente, transforma a frente de ondas plana numa frente esférica.

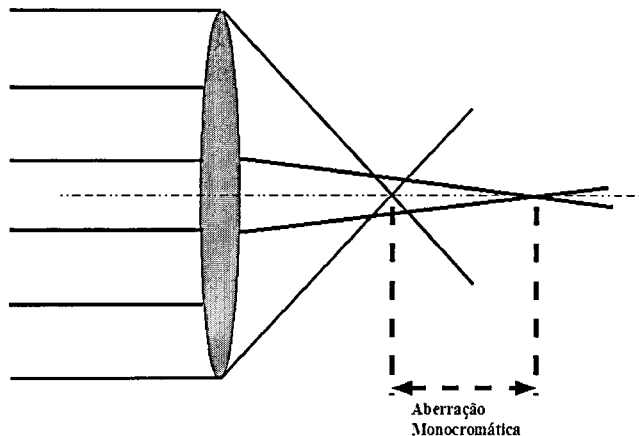


Figura 4.9 Aberração monocromática

Consequentemente, todas as frentes de ondas são esféricas e concêntricas num ponto (foco da lente). Na realidade, as lentes (não ideais) modificam as frentes de onda de modo a que os raios do centro são alterados de modo diferente dos da periferia, causando a não coincidência num único ponto focal. Este fenómeno é denominado por *aberração monocromática*.

### 4.2.3 Distorção em Barril

Quando a distância entre a câmara e o objecto é baixa, mas por outro lado se pretende ter um campo de visão largo, aparece a distorção em barril. Esta distorção depende do campo de visão angular da lente usada [6].

Este fenómeno pode ser facilmente observado. Para isso adquire-se uma imagem de um objecto padrão, uma grelha quadriculada uniformemente construída por exemplo, estudando

<sup>4</sup> Apenas possui um comprimento de onda

as distâncias entre linhas da imagem adquirida. Se estas forem constantes e independentes da posição que tomam na imagem então o sistema não sofre de distorção em barril. Na Figura 4.10 representa-se uma imagem em que é visível a distorção em barril.

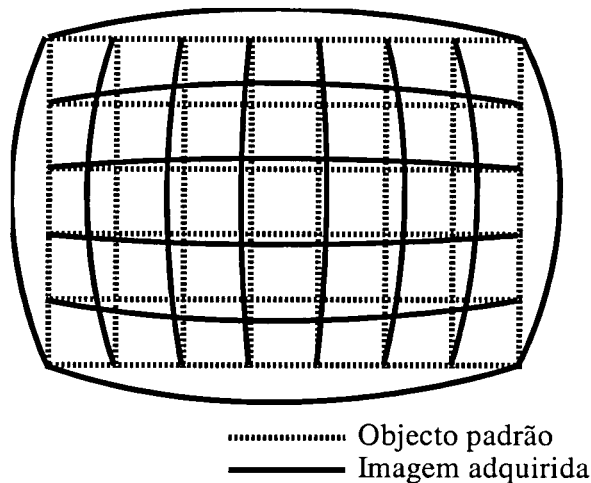


Figura 4.10 Distorção em barril

É certo que este efeito pode ser corrigido. Conhecendo o mapeamento mundo-pixel (Figura 4.11), pode-se determinar o processo inverso (mapeamento pixel-mundo) e estimar a posição de um objecto que esteja colocado no pixel  $(x,y)$  [6].

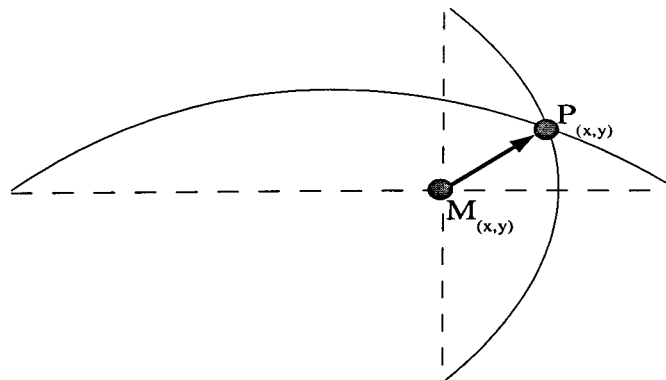


Figura 4.11 Mapeamento Mundo-Pixel

Se a aquisição for linear, como indicado na Figura 4.12, não fará sentido trabalhar com uma imagem de grelha mas sim com linhas paralelas cujo espaçamento é constante. Neste caso pretende-se criar o mapeamento mundo-pixel apenas numa dimensão.

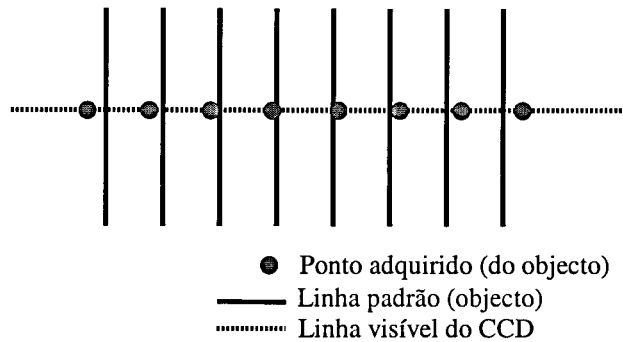


Figura 4.12 Distorção em barril associado a um CCD linear

Neste caso, e se for conhecido também o mapeamento mundo-pixel (muito mais simples que no caso matricial), torna-se também possível determinar o processo inverso e mapear cada pixel no mundo.

## 4.3 Iluminação

### 4.3.1 Quantidade de Luz

A quantidade de luz incidente no objecto a adquirir é importante porque possui vantagens e desvantagens.

Uma elevada quantidade de luz origina uma desvantagem importante que reside no facto de ser gerado muito calor que deverá ser apropriadamente tratado para minimizar influências nos sistemas mecânicos e até mesmo electrónicos [2], para além do aspecto económico.

Por outro lado, a quantidade de luz ser elevada é benéfico, porque permite uma relação sinal/ruído (SNR) alta e um *tempo de exposição* (Cap. 3.3) baixo [2]. O tempo de exposição está directamente relacionado com o efeito de arrastamento. Assim, se o tempo de exposição baixar, o corpo poder-se-á mover mais rápido uma vez que a imagem adquirida não é afectada por este fenómeno.

No caso em que se pretende adquirir uma imagem linha a linha (scanners, tapetes, cilindros, etc) torna-se estritamente necessário possuir um tempo de exposição baixo, obrigando assim ao uso de uma quantidade de luz significativa.

### 4.3.2 Incidência

Para além da quantidade de luz incidente, a forma como esta incide no objecto é fortemente influenciável na aquisição da imagem. Assim, deverá ser escolhida uma luz uniforme, e para isso, a distância do foco de luz até ao objecto deverá ser grande (note-se as “sombras” que algumas fontes de luz produzem), obrigando assim a um aumento da intensidade luminosa por parte da fonte.

Poderá existir a necessidade de usar uma fonte luminosa dupla em virtude de se obter uma iluminação mais constante, uma vez que o uso de apenas uma fonte luminosa origina um arco maior como indicado comparativamente na Figura 4.13 e Figura 4.14.

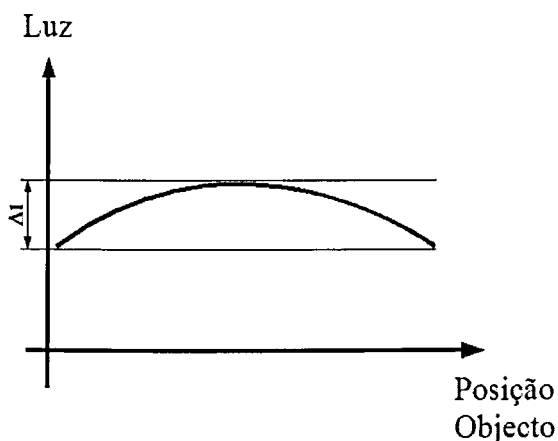


Figura 4.13 Iluminação de um objecto com uma fonte luminosa

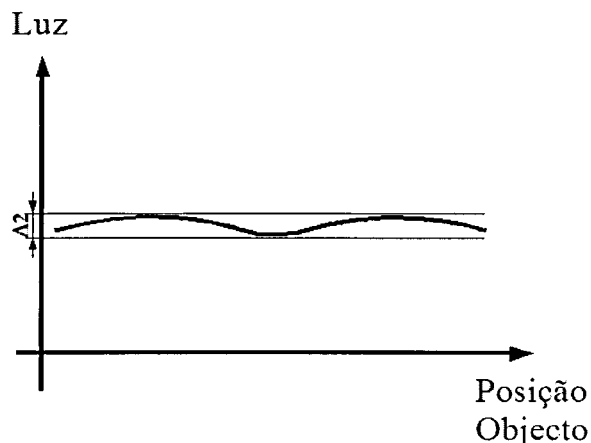


Figura 4.14 Iluminação de um objecto com fonte luminosa dupla

Uma vez que  $\Delta 2 < \Delta 1$  torna-se mais vantajoso o uso de uma iluminação dupla.

### 4.3.3 Tipo de fonte luminosa

A alimentação da fonte luminosa deverá também ser cuidada, uma vez que a frequência da rede (50 ou 60 Hz) poderá influenciar a aquisição. Neste caso o uso de fontes DC torna-se uma hipótese ou até mesmo o uso de lâmpadas de baixa tensão, obrigando assim a um filamento de maior diâmetro que permite obter uma maior imunidade à frequência de alimentação.

Outro tipo de iluminação que pode ser adoptado é a iluminação fluorescente, cuja

forma da fonte luminosa poderá ser mais apropriada a certos casos (cilíndrica, por exemplo). Este tipo de iluminação tem a característica da quantidade de luz cintilar com a mesma frequência de alimentação. É certo que neste tipo de lâmpadas poderá ser adoptada uma alimentação de alta frequência (exemplo da Philips<sup>TM</sup> que dispõe de balastros electrónicos a 28 kHz [7]) diminuindo assim a interferência da cintilação da luz na imagem adquirida.

## 4.4 Aplicação prática

O caso de estudo baseou-se na aquisição de uma rolha a qual rodava em torno do seu eixo, e era adquirida com uma câmara linear.

### 4.4.1 Projecção da imagem

Na situação prática desenvolvida, usou-se uma lente de 6 mm (distância focal -  $D_f$ ). Para se conseguir que uma superfície de uma rolha de 45mm ( $H_{obj}$ ) seja totalmente projectada no CCD, o qual possui um comprimento de linha sensível de  $256 \times 14 \mu m = 3.58 \text{ mm}$  ainda com alguma distância de segurança (tomando por exemplo  $H_{img} = 1,6\text{mm}$ ) e para uma distância do objecto até à lente de 160 mm vem  $D_{img} = 6,2\text{mm}$  que indica a distância do CCD à lente. Pode, então ser estimado o tamanho de cada pixel em área visível utilizando a Equação 4.10 em que é conhecido  $H_{img}$  (14 $\mu\text{m}$ ),  $D_f$  (6 mm) e  $D_{obj}$  (160 mm), resultando  $H_{obj}=0.3593 \text{ mm}$ . Ou seja, cada pixel corresponderá aproximadamente a 0.36 mm na superfície da rolha (horizontalmente).

Verticalmente, não poderá existir uma constante de proporcionalidade uma vez que

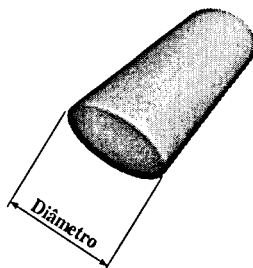


Figura 4.15 Diâmetro de uma rolha

o número de linhas necessárias para varrer toda a rolha será função da velocidade de rotação desta. Mas, como este valor poderá ser estimado (e com boa aproximação) por software, apenas

será necessário conhecer o perímetro da rolha (distância vertical), tipicamente especificado à custa do diâmetro desta. Conhecendo o diâmetro da rolha, o seu perímetro poderá ser calculado:

$\pi \cdot \text{Diâmetro}$ . Como o número de linhas necessárias para varrer toda a superfície é conhecida (Cap. 7.1.2), a imagem da rolha poderá ser espalmada obtendo-se assim um rectângulo cujas dimensões são comprimento da rolha por perímetro desta. Assim sendo, o mapeamento linha-mundo pode ser determinado através da equação 4.11.

$$K_{\text{vertPIXmm}} = \frac{\pi \cdot \text{diâmetro}}{n^{\circ} \text{ linhas / rolha}} \quad (4.11)$$

Conhecendo a relação entre o número de pixeis e a distância real, torna-se possível calcular as áreas de defeitos em  $\text{mm}^2$ .

Uma vez posicionados correctamente todos os componentes, lente, CCD, rolha e iluminação, a necessidade da focagem, funcionando como um ajuste fino, torna-se inevitável para se obter uma imagem o mais nítida possível.

Para além da focagem, torna-se também necessário ajustar o diafragma da lente de modo a obter a intensidade luminosa pretendida para o CCD. Esta se for excessiva, provocará a saturação do CCD.

Existem então dois graus de liberdade para ajustar o nível de luz: Intensidade luminosa incidente na rolha e o referido diafragma da objectiva. Na prática, a rolha deverá ser iluminada com uma forte fonte luminosa, obrigando o diafragma a fechar com a finalidade de minimizar as variações de luminosidade exteriores e do ruído. Consegue-se assim maximizar o rácio sinal/ruído. Na realidade existe ainda outro grau de liberdade para o ajuste do nível de luz que será o tempo de exposição, mas que no caso prático é constante e o máximo conseguido pelo microcontrolador de forma a maximizar o número de linhas lidas por segundo<sup>5</sup>.

#### 4.4.2 Distorção em barril

Como a aquisição usada é apenas uma linha, não faz sentido falar de distorção em barril mas um fenómeno equivalente a uma dimensão. Pode-se compensar esta distorção

<sup>5</sup>Cada linha necessita de  $280\mu\text{s}$  para ser varrida.

recorrendo a uma função de mapeamento pixel-mundo mas ficando sempre como uma fonte de incerteza. Com a câmara de aquisição desenvolvida e usada, esta distorção é mínima podendo ser até desprezada. Para o cálculo desta distorção foi adquirida a imagem com um padrão de linhas paralelas e uniformemente espaçadas como indicado na Figura 4.16.

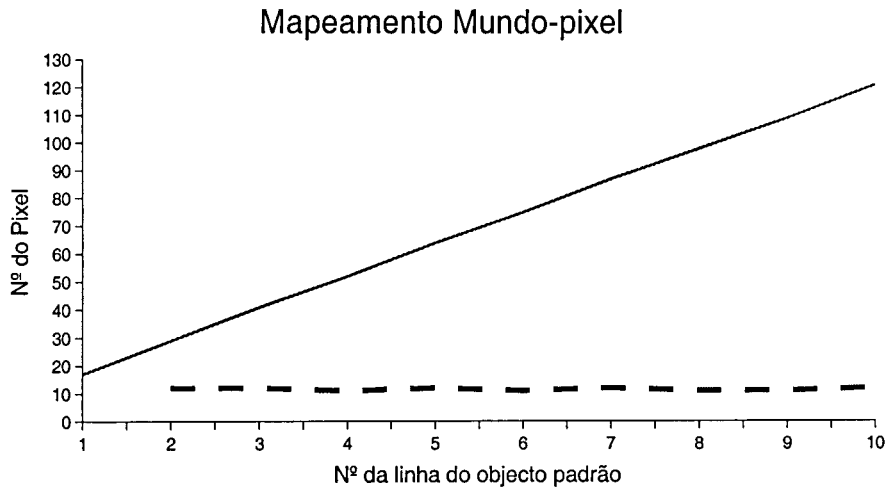


*Figura 4.16 Imagem adquirida com um padrão de linhas paralelas*

A posição de cada linha medida em pixels pode ser descrita como indicado na Tabela 4.1.

<i>Nº linha imagem</i>	<i>Posição</i> —————	<i>Distância</i> - - - -
1	17	-
2	29	12
3	41	12
4	52	11
5	64	12
6	75	11
7	87	12
8	98	11
9	109	11
10	121	12

*Tabela 4.1 Posição (pixel) das linhas da imagem*



*Gráfico 4.1 Mapeamento Mundo-pixel*

Atendendo ao Gráfico 4.1 pode-se constatar que o mapeamento pixel-mundo é aproximadamente linear. Assim sendo, apenas se torna necessário multiplicar o pixel por um ganho (referido no Cap. 4.4.1 - Equação 4.11) de modo a obter a representação no mundo em milímetros.

### 4.4.3 Iluminação

Com a finalidade de possibilitar a variação da intensidade luminosa, foi desenvolvida uma fonte de alimentação de tensão regulável DC, o que permitia também diminuir o efeito visível dos 50 Hz, embora este efeito não seja muito notável, ou seja, uma imagem adquirida com a iluminação de uma lâmpada de baixa tensão alimentada a AC e outra a DC são aproximadamente semelhantes.

## 5 Rede Ethernet

Para transferência de mensagens entre dois sistemas, podem ser usados vários tipos de rede. Deve-se, sempre que possível, usar protocolos *standard* facilitando assim o Hardware (uma vez que já se encontra desenvolvido e testado). A rede, hoje em dia, que possui uma maior acessibilidade, fiabilidade e velocidade a baixo custo é a rede *ethernet*. Este tipo de rede, é facilmente adquirida e torna simples a interface com redes de computadores.

É uma rede que começou na década de 1960 como um projecto de pesquisa de comutação de pacotes, e que a partir da década de 1990 passou a ser a rede mais usada entre computadores [8].

### 5.1 Modelo de Referência OSI

O modelo OSI foi proposto pela Organização Internacional de Standards como um primeiro passo para colocar os protocolos usados nas várias camadas *standards*. O modelo é denominado *ISO-OSI (Open Systems Interconnection) Reference Model*, uma vez que comunica com sistemas abertos (sistemas disponíveis para comunicação com outros sistemas). Tipicamente denominado simplesmente por modelo *OSI* [9].

Este modelo está dividido em 7 Camadas (*Layers*), indicado na Figura 5.1, contendo:

- *Camada da Aplicação* (Origem da mensagem/recepção da mensagem)
- *Camada da Apresentação* (Preocupa-se com a sintaxe e semântica da informação)
- *Camada da Sessão* (Permite ao utilizador estabelecer sessões em diferentes máquinas)
- *Camada do Transporte* (Troca dados com a Camada da Sessão, parte em pacotes de menores dimensões se necessário, e garante que a mensagem atinge o receptor correctamente)
- *Camada da Rede* (Preocupa-se com o controlo da rede e subrede)
- *Camada da Ligação* (Cria uma ligação “virtual” livre de erros para a camada de rede)
- *Camada Física* (Preocupa-se com definição de tensões, tempos, etc...)



*Figura 5.1 Modelo OSI - 7  
Camadas*

Uma vez conhecido o Modelo OSI, a adaptação para outro modelo poderá ser efectuada através de um mapeamento, e simplificação de camadas. Assim, o modelo que existe na Ethernet é o TCP/IP, e pode ser mapeado em OSI.

## 5.2 Modelo TCP/IP ou UDP/IP

Mapeando o *Modelo TCP/IP* no *Modelo OSI*, resultam 4 camadas [10], com funções distintas:

- Camada da Aplicação (Application Layer)
- Camada de Transporte (Transport Layer)
- Camada de Rede (Network Layer)
- Camada de Ligação + Física

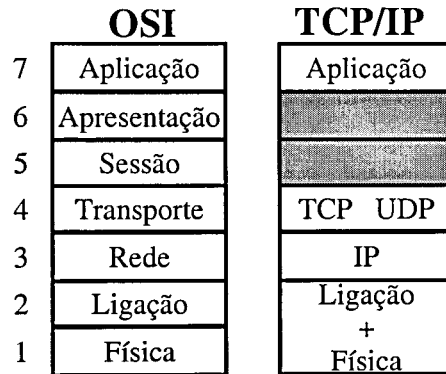


Figura 5.2 Modelo TCP/IP

As Camadas Apresentação e Sessão, não estão presentes no Modelo TCP/IP como indicado na Figura 5.2 [10] [11] [12]. Assim, a aplicação deverá comandar directamente a camada de transporte, e atender os pedidos efectuados por esta, nomeadamente aquando da chegada de um pacote de informação.

Um exemplo de interligação de camadas pode ser observado na Figura 5.3.

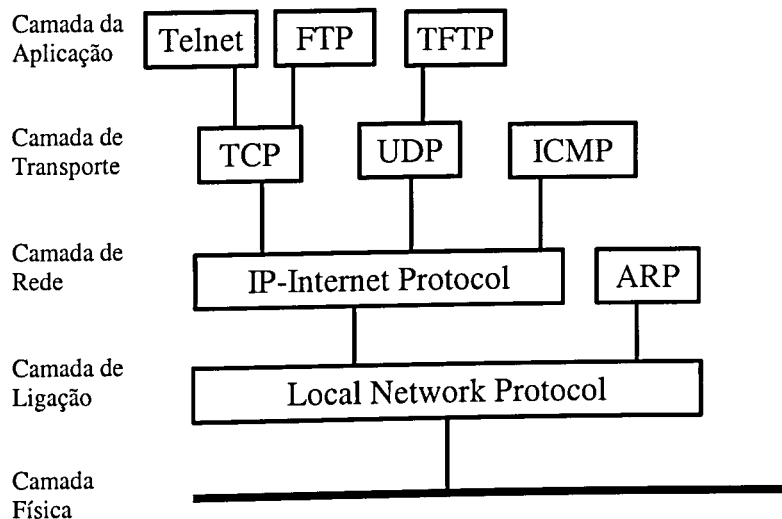


Figura 5.3 Exemplo de Camadas da rede Ethernet segundo Modelo TCP/IP

O funcionamento entre camadas é desencadeado através de eventos. Assim sendo, uma aplicação poderá transmitir informação à camada inferior (Camada de Transporte). Esta por sua vez, coloca um cabeçalho na informação recebida e transmite-a à camada inferior (Camada de

Rede), que por sua vez também lhe adiciona um cabeçalho passando à camada seguinte e assim sucessivamente, até que este “pacote de informação” atinja a camada física, viajando pela rede. Do lado do receptor, a camada física transmite a informação até à aplicação passando pelas camadas intermédias as quais tiram a informação correspondente que foi adicionada do lado do emissor. Atinge assim à camada superior (Camada da Aplicação) a mensagem idêntica à que foi originada.

### 5.2.1 Camada física

Este tipo de rede é baseado em par entrelaçado. Os fios são entrelaçados numa forma elíptica, à semelhança de uma molécula DNA [13]. O facto dos fios serem entrelaçados permite reduzir interferências eléctricas provenientes do exterior (cabos adjacentes).

Desde 1988, a categoria 5 de pares entrelaçados foi adoptada. Semelhante à categoria 3 mas com maior número de entrelaçamentos por comprimento e isolamento em *teflon*, permite obter uma maior imunidade ao ruído em longas distâncias e torna-se possível transmitir maiores frequências [14] o que acarreta a maior largura de banda. O vulgar e conhecido UTP (*Unshielded Twisted Pair*) é largamente utilizado para transferência de dados em redes de computadores ao contrário dos cabos blindados os quais têm grande utilidade para comunicações analógicas.

### 5.2.2 Camada de Rede (Network Layer)

A camada de Rede controla as operações da rede e subrede, nomeadamente eventuais congestões que possam aparecer durante as transmissões de pacotes. Para além deste controlo, no caso de redes diferentes (tamanhos diferentes dos pacotes, endereços diferentes, etc.) estarem interligadas, é até esta camada que os problemas são resolvidos a fim de serem permitidas ligações de redes heterogéneas [15]. Tipicamente o protocolo usado a este nível é o IP (Internet Protocol).

### 5.2.3 Camada de Transporte (Transport Layer)

A função principal desta camada é aceitar informação da camada superior (aplicação), parti-la em pacotes inferiores (caso necessário), passar a informação à camada inferior e assegurar-se que toda a informação atinge correctamente o receptor [15]. Essencialmente existem dois tipos de protocolos completamente distintos: TCP e UDP. Ambos usam IP (Internet Protocol) como protocolo da camada de rede adjacente [11].

#### 5.2.3.1 TCP

Genericamente, pode afirmar-se que TCP (Transmission Control Protocol) é um protocolo orientado à conexão. Este termo significa que duas aplicações que usem TCP têm, obrigatoriamente, que estabelecer uma conexão antes de iniciarem a troca de dados. Uma analogia típica, é um telefonema em que o *terminal A* marca o número, espera que o *terminal B* atenda e diga “Está, quem fala???” [16].

Este protocolo garante a retransmissão de pacotes perdidos, a ordem pela qual foram enviados (mesmo que trocada durante a transmissão) e ignora-os caso sejam repetidos [17]. No caso da quantidade de informação a transmitir não seja possível com um só pacote, este protocolo automaticamente a divide. Estas propriedades são transparentes para a aplicação, uma vez que não há necessidade desta se preocupar com os dados da transmissão na rede, apenas faz o envio e a recepção de dados.

#### 5.2.3.2 UDP

UDP (User Datagram Protocol) é um protocolo simples, orientado aos datagramas e que, ao contrário do TCP, não necessita de conexão. Cada pacote de informação que a aplicação pretende enviar produz exactamente um e um só datagrama UDP (pode ser partido no caso da informação exceder o limite), que originará um datagrama IP para ser enviado para a rede [18].

Este protocolo fornece um serviço simples à Camada de Aplicação. Apenas envia dados (datagramas) de um terminal para outro mas sem garantir que a informação atinge o

receptor. Qualquer confirmação da chegada ao receptor da mensagem apenas poderá ser efectuada na aplicação [12].

Uma vez que este protocolo não tem a capacidade de partir a informação de forma a introduzi-la em vários pacotes (como acontecia em TCP), deve-se ter atenção à dimensão dos dados que se pretendem enviar. O tamanho máximo, teórico, de um datagrama IP é de 65535 bytes, impostos pelos 16 bit do comprimento total do cabeçalho IP. Com um cabeçalho IP de 20 bytes e com um cabeçalho UDP de 8 bytes, ficam livres, no máximo, 65507 bytes de dados a serem preenchidos pelo utilizador (aplicação). Normalmente, as implementações permitem um máximo inferior a este valor encontrado. Assim, por vezes, alguns sistemas permitem até um máximo de 8192 ou 32767 bytes para pacotes UDP [19].

### 5.3 Aplicação Prática

Uma das decisões importantes deste projecto baseia-se essencialmente na escolha do protocolo da Camada Transporte. Uma vez que, o protocolo UDP permite aceder de uma forma simplificada à rede, foi escolhido para a transmissão de imagem entre o microcontrolador e o PC e vice-versa. O facto de não fornecer mecanismos de detecção de perdas nem trocas de pacotes não é problema uma vez que a rede usada não contém elementos de comutação diminuindo assim a probabilidade de perda e troca de pacotes. Para além disso, poderá ser adicionada na Camada Aplicação (do PC) uma sincronização com a Camada do mesmo nível do lado do microcontrolador que permite obter o sincronismo e a garantia de que todas as linhas foram transmitidas (incluir no pacote UDP o número da linha a que correspondente).

Na realidade esta ligação pode ser simplificada com um cabo “crossover” uma vez que apenas existem dois terminais na rede (microcontrolador e PC). Ambos terminais pertencem à mesma subrede e, obviamente, com IPs diferentes. É certo que no caso de serem utilizadas mais câmaras, esta solução não será viável, mas para isso usar-se-iam outros processos (Cap. 5.5).

Mas no caso da aquisição via uma só câmara, torna-se necessário atribuir um IP ao controlador ethernet e outro à carta de rede do PC, (ambos na mesma subrede) depois de registar convenientemente o controlador de ethernet no microcontrolador. Para isso, usam-se as funções disponíveis fornecidas com o projecto *ethernet* (Cap. 6.3).

Neste caso a configuração de rede usada está representada na Figura 5.4.

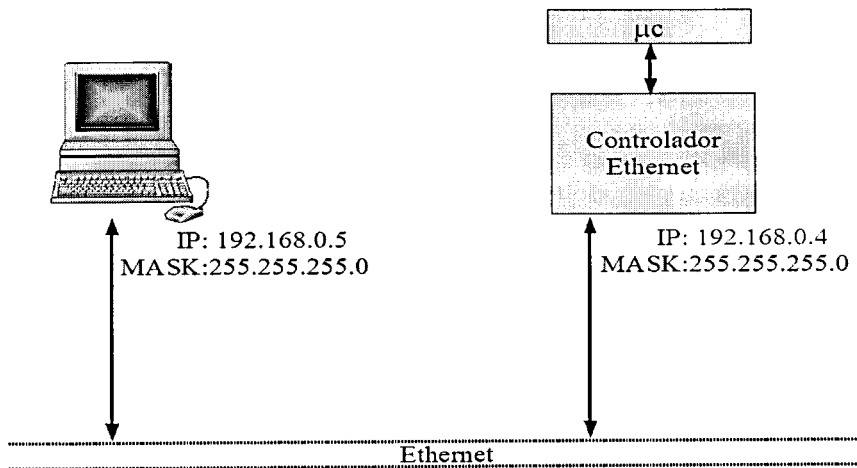


Figura 5.4 Configuração da rede Ethernet

Genericamente seriam usadas as configurações;

```
NutRegisterDevice(&devEth0, 0x8300, 5);
```

```
NutNetIfConfig("eth0", mac, inet_addr("192.168.0.4"),inet_addr("255.255.255.0"));
```

## 5.4 Resultados Práticos

Transmitindo a imagem linha a linha e utilizando a sincronização entre emissor e transmissor, obtiveram-se os resultados esperados: não há perda nem troca de linhas na transmissão num número significativo de testes. Pode-se assim concluir que a rede é fiável e transmite uma imagem de 110 linhas por 256 pixels a uma resolução de 256 tons de cinzento em apenas 115.5 ms (1050 µs por linha). Na realidade o tempo de aquisição de uma linha (varrimento do CCD) é de 280 µs. Ou seja, o tempo total de transmissão e aquisição por linha é de 1.33ms. Para a aquisição e transmissão de toda a imagem necessita-se aproximadamente de 150 ms.

## 5.5 Projectos Futuros – Múltipla aquisição

É de prever o crescimento de um sistema, implicando o uso de várias câmaras de aquisição de imagem em simultâneo. Assim sendo, é possível usar várias câmaras ligadas ao mesmo PC podendo ser adoptadas várias soluções.

Uma vez que o controlador de ethernet embebido funciona a 10 Mbit/s, pode-se usar um hub, e as várias câmaras. O problema residirá na rede que fica limitada a esta velocidade. A Figura 5.5 ilustra esta situação.

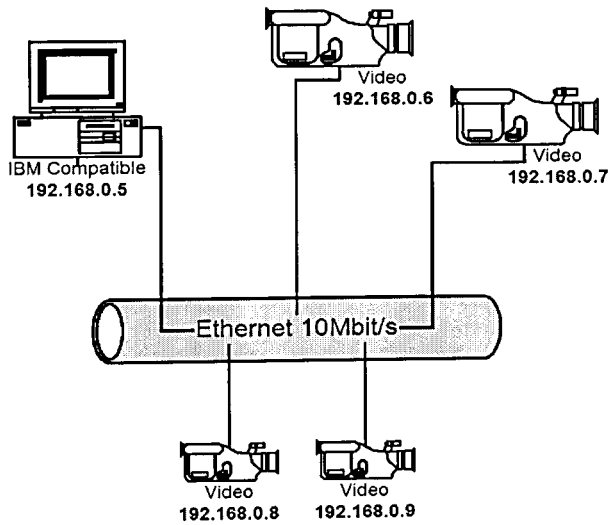


Figura 5.5 Aquisição múltipla com Hub

Outro processo seria usar um *switch* que comute pacotes entre redes a 10Mbit/s e 100Mbit/s. Neste caso, optar-se-ia por ter cada câmara ligada a cada porta do *switch* (ligações a 10Mbit/s) e uma ligação entre o *switch* e o PC a 100Mbit/s. (Figura 5.6). Neste caso, o *switch* deveria ter a capacidade de comutar pacotes entre redes a velocidades diferentes.

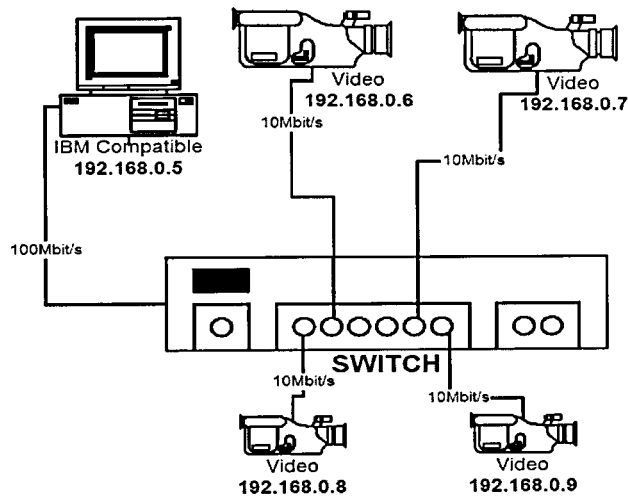


Figura 5.6 Múltipla aquisição com Switch

Por fim, uma outra solução seria usar uma carta de rede no PC para cada câmara. Ou seja, seria criada uma subrede para cada câmara de aquisição.

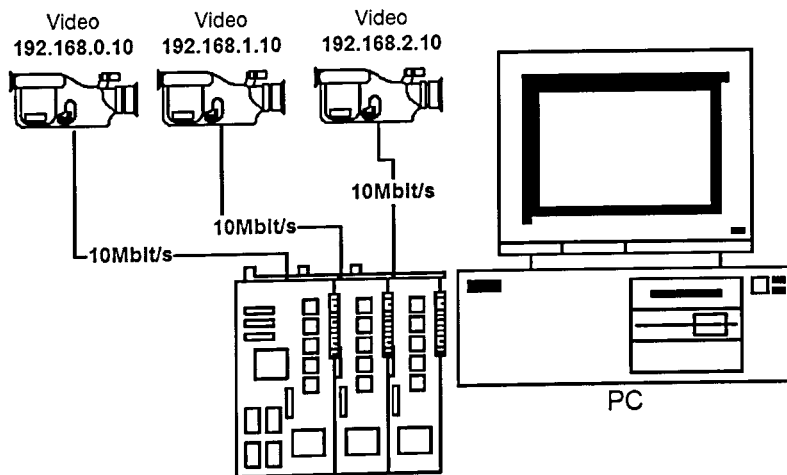


Figura 5.7 Múltipla aquisição com várias cartas de rede Ethernet

Esta solução apresenta uma vantagem uma vez que garante, por princípio, a ausência de eventuais colisões que possam aparecer, no caso de um *switch*. Outro factor será o económico: para o caso de poucas câmaras, torna-se vantajoso este processo, mas aumentando o número de câmaras, o preço de um *switch* será mais baixo do que várias cartas de rede. Na realidade esta decisão poderá ser fruto para um estudo mais aprofundado e necessita da informação de preços dos referidos equipamentos.

## 6 Hardware

Neste projecto, foram integrados sistemas adquiridos e desenvolvidos. A câmara de CCD assim como o respectivo sistema de condicionamento de sinal foram desenvolvidos e integrados no projecto *ethernut*<sup>6</sup> (adquirido) formando assim um sistema dotado da capacidade de adquirir imagens lineares e enviá-las através de pacotes para a rede. A Figura 6.1 ilustra, de uma forma geral, a base de todo o sistema.

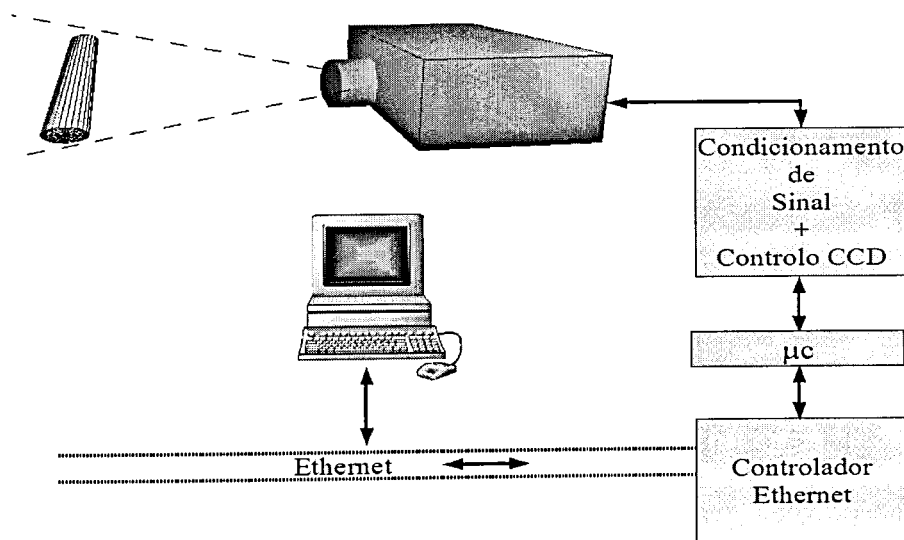


Figura 6.1 Sistema câmara-controlador-PC

O microcontrolador (*ATMega128*, da *ATMEL*<sup>TM</sup>), comunica com o controlador de *ethernet*, controla o CCD, excitando-o, e adquire, através de um conversor A/D, os pixels digitalizados a 256 tons de resolução (8 bits).

Cada linha (256 pixels) é adquirida e armazenada na memória externa do microcontrolador, sendo enviada posteriormente para a rede *ethernet* através do respectivo controlador *Realtek RTL8019AS*. Assim garantem-se tempos entre linhas constantes (tempo de exposição constante), assim como a leitura de uma linha efectuada sem quaisquer interrupções. Na realidade, na rede podem existir pacotes entre o sistema de aquisição e o PC assim e vice-versa. O PC pode controlar, nomeadamente arrancar ou parar o sistema de controlo do CCD. Assim, este quando parado, não envia nenhum pacote para a rede até que assim seja dada ordem para tal. A capacidade de interligar várias câmaras na mesma rede (5.5), torna-se possível sendo

<sup>6</sup> Projecto alemão que resultou na integração de um microcontrolador e um controlador de rede Ethernet

necessário neste caso o uso de um *hub*, *switch* ou equipar o PC devidamente com cartas de rede.

## 6.1 Câmara CCD Linear

No interior da câmara, está alojada uma placa de circuito impresso com o CCD, reguladores de tensão, condensadores de desacoplamento<sup>7</sup>, e um simples seguidor de tensão efectuado com um transistor configurado em colector comum permitindo assim uma adaptação de impedâncias (de alta para baixa).

A posição do circuito integrado CCD, ILX521K da Sony com 256 pixels, é crítica, pois deverá estar centrada no eixo da objectiva e também colocada à distância desta calculada anteriormente. Para que o CCD funcione é necessário excitá-lo fornecendo-lhe assim dois sinais de relógio, o fim de linha ( $\phi$ ROG) e o varrimento dos pixels ( $\phi$ CLK). A cada flanco ascendente do sinal  $\phi$ CLK (cerca de 1MHz), é colocado no  $V_{OUT}$  o sinal analógico de um pixel com um atraso de 110ns. Este tempo de atraso é importante para dar ordem de conversão ao conversor A/D. Na realidade este atraso depende do modo pelo qual o CCD está configurado. Existem dois modos disponíveis neste sensor: com ou sem "*Sample-and-Hold*" interno como indicado nas Figuras 6.2 e 6.3. O modo usado (com *S&H* interno) torna mais simples a utilização do CCD uma vez que a saída permanece constante entre pixels. Assim sendo, a ordem de conversão para o A/D (*Start conversion*) apenas terá que obedecer à frequência do varrimento dos pixels, não sendo obrigatório ajustá-la fazendo coincidir com o intervalo de tempo em que o pixel está presente no  $V_{out}$ , e dispensando também o uso de um *Sample & Hold* externo, o qual por vezes se torna obrigatório noutros fabricantes de CCDs.

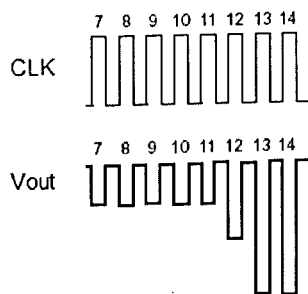


Figura 6.2 Saída do CCD sem *sample & hold*

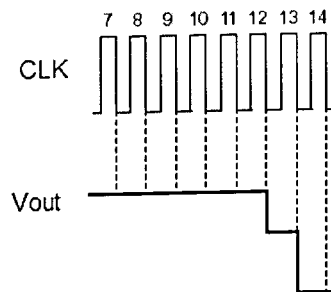


Figura 6.3 Saída do CCD com *sample & hold*

<sup>7</sup> Capacidades que permitem diminuir interferências devido ao ruído presente na tensão de alimentação

Para além deste factor, a capacidade intrínseca do cabo que faz a ligação entre a câmara e o A/D poderá influenciar a forma de onda da tensão de vídeo (saída do CCD), funcionando como um filtro passa baixo, indesejável no caso. Se for pretendido transmitir um sinal como o indicado na Figura 6.2 no cabo, é certo que a capacidade deste irá influenciar a forma de onda do sinal da imagem. Assim sendo, tornar-se-á mais vantajoso o uso do *sample & hold* interno.

### 6.1.1 Desenvolvimento da câmara de CCD

Uma vez tratados os problemas de electrostática e de posicionamento do CCD (Cap. 3.7 e Cap. 4.4.1), deve-se atender às características eléctricas e funcionais do componente. Embora a impedância de saída do sinal de vídeo seja relativamente baixa ( $350 \Omega$  segundo o fabricante), torna-se necessário proteger esta contra eventuais erros que possam resultar em “curto-circuitos”. Neste contexto, o fabricante propõe o uso de um seguidor de tensão em colector comum. Os restantes sinais de controlo, são compatíveis com TTL. O esquema eléctrico está apresentado na Figura 6.4.

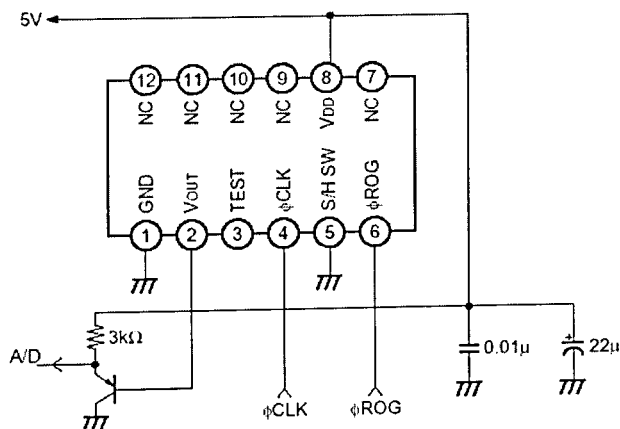


Figura 6.4 Esquema eléctrico da câmara CCD

## 6.2 Condicionamento e conversão de sinal

Uma vez que os computadores apenas podem processar imagens digitais, e a natureza fornece imagens de outra forma (analógica) torna-se necessário a conversão de um sinal

analógico para digital [20]. Este bloco é responsável por digitalizar pixel a pixel de forma a colocar na memória do microcontrolador um valor proporcional à intensidade luminosa presente em cada pixel. Para além da conversão A/D é necessário ajustar o nível de tensão da saída do CCD à entrada do conversor A/D. O conversor utilizado de 8 bits (TLC5540, da Texas Instruments) permite adquirir o sinal até uma taxa de amostragem de 40 MHz. A entrada deste conversor também pode ser configurada entre três modos que dependem da gama de tensões que se pretende na entrada. No modo zero, torna-se necessário indicar exteriormente a gama de tensões a converter. No modo "Bias 1" a gama de tensões a converter é gerada internamente de 0.61V a 2.63V. No modo "Bias 2" a gama de tensões de entrada varia entre 0V (AGND) e 2.28V.

Por outro lado, a tensão de saída do CCD tem uma amplitude entre 0.6V e 0.8V, mas com um offset de 3.8V segundo o fabricante, como indicado na Figura 6.5.



Figura 6.5 Níveis de tensão de saída do CCD

Assim sendo, torna-se necessário ajustar a gama de tensões assim como amplificá-la. Para isso faz-se uso de um amplificador operacional rápido (IC2-LF356) como indicado na Figura 6.6. Este adaptador de tensões, permite usar um dos modos *Bias 1* ou *Bias 2* do conversor A/D, calibrando-o convenientemente para o caso escolhido.

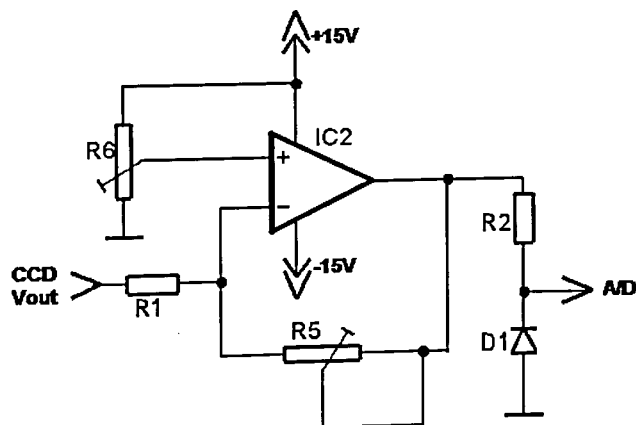


Figura 6.6 Adaptador de tensões: CCD -> A/D

Uma vez desenhado o circuito eléctrico do adaptador referido, pretende-se determinar a sua

função de transferência. Esta poderá ser determinada, partindo das aproximações:

- corrente de entrada do amplificador operacional é desprezável (entrada MOSFet)
- Tensão na entrada inversora ( $V_-$ ) idêntica à tensão na entrada não inversora ( $V_+$ ), uma vez que o amplificador operacional se encontra realimentado.

Logo vem,

$$I_{RI} = \frac{V_{out}^{CCD} - V_+}{R_1} \quad (6.1)$$

como

$$I_{RI} = I_{R5} \quad (6.2)$$

$$V_{A/D} = R_5 \cdot I_{R5} + V_+ \quad (=) \quad (6.3)$$

$$V_{A/D} = \frac{R_5}{R_1} \cdot (V_{out}^{CCD} - V_+) + V_+ \quad (=) \quad (6.4)$$

$$V_{A/D} = \frac{R_5}{R_1} \cdot V_{out}^{CCD} + \left(1 - \frac{R_5}{R_1}\right) \cdot V_+ \quad (6.5)$$

em que  $V_+$  é regulado através do potenciômetro (divisor de tensão)  $R_6$ .

Assim,  $R_6$  permite ajustar o offset da saída do CCD e  $R_5$  o ganho de modo que a gama da entrada do conversor A/D seja praticamente toda utilizada.

$D1$  e  $R2$  garantem que na entrada do conversor nunca sejam introduzidas tensões negativas, que podem danificar este componente.

Ao contrário de um sinal de vídeo composto (Ex. PAL) [21] em que os sinais de sincronismo horizontal e vertical estão adicionados no sinal de vídeo nas zonas “*sem imagem*”, o sinal de vídeo da câmara CCD desenvolvida vem separado do sincronismo de fim de linha. Note-se que existem dois sinais de sincronismo em que o fim de linha é equivalente ao sincronismo horizontal do sinal de vídeo PAL, enquanto que o outro sinal de sincronismo (pixels) é responsável, por exemplo entre outras funções, para dar origem à conversão analógica-digital do conversor. Ambos os sinais de sincronismo são compatíveis com TTL, obviamente, uma vez que

são originados pelo microcontrolador. Assim estão presentes no microcontrolador os pixels digitalizados com uma resolução de 8 bits.

### 6.2.1 Calibração do adaptador de tensões

A calibração de R5 e R6 deve ser efectuada com uma imagem que ocupe toda a gama de saída do CCD desde pontos pretos até, no limite, à saturação. É certo que, na prática, este ajuste poderá ser efectuada com uma tensão de entrada sinusoidal, por exemplo, a variar entre os valores pretendidos.

### 6.2.2 Ethernet

Este projecto poderá ser considerado um sistema de microcontrolador com ethernet embebida. É constituído por um controlador de ethernet (*Realtek RTL8019AS*) a 10 Mbit/s e por um microcontrolador da ATMEL™ (ATMega128) com a respectiva ligação ao controlador ethernet, através de um barramento de dados e endereços. É fornecido com o código fonte e funções que facilitam o uso deste sistema à semelhança de um sistema operativo, chamadas ao sistema (Cap. 6.3). Ambos os componentes estão alojados na mesma placa de circuito impresso, e possuem desde conversores A/D, porta série, *watchdog*, e memória ram externa.

## 6.3 Chamadas ao sistema “*ethernut*”

Chamadas ao sistema, são funções já desenvolvidas para o microcontrolador em causa, que permitem tratar *threads* (criar, eliminar e controlar), configurar periféricos, tais como o controlador ethernet (IP, mascara da rede, etc.) e a porta série (baud rate, stop bits, etc). Existem também funções de envio e recepção (interrupções) de dados quer via ethernet quer via porta série. Fica assim facilitado o envio/recepção de pacotes TCP e UDP, servidor de *http*, *ftp*, etc, assim como o uso de quaisquer periféricos.

Para a definição de um periférico apenas é necessário usar da função *NutRegisterDevice*. Exemplo:

```
NutRegisterDevice(&devEth0, 0x8300, 5);
```

que indica a existência de um controlador de ethernet no endereço 8300h, e a interrupção 5 do microcontrolador está definida para o atendimento de chegadas de eventos via rede.

Para a configuração do respectivo periférico, torna-se necessário o uso de função *NutNetIfConfig*.

Exemplo:

```
NutNetIfConfig("eth0", mac, inet_addr("192.168.0.4"),inet_addr("255.255.255.0"));
```

que configura o adaptador de rede (eth0), com um *mac address* (no caso concreto {0x00,0x06, 0x98, 0x01, 0x00, 0xc3}), com o IP 192.168.0.4 da máscara de rede 255.255.255.0.

## 6.4 Controlador do CCD

Toda a aquisição da imagem é controlada pelo microcontrolador que é responsável pela geração dos sinais de excitação para o CCD, controlo da conversão para o A/D e comunicar com o controlador de ethernet, introduzindo assim os pacotes na rede contendo as linhas adquiridas. Este microcontrolador executa um ciclo fechado com as operações sequenciais de gerar o varrimento dos *dummy* pixeis (Cap. 3.2), varrer os pixeis visíveis um a um, terminar com os *dummy* pixeis e originar conversão para digital dos pixeis visíveis armazenando em memória o respectivo valor do conversor. Este ciclo pode ser observado no Diagrama 6.1.

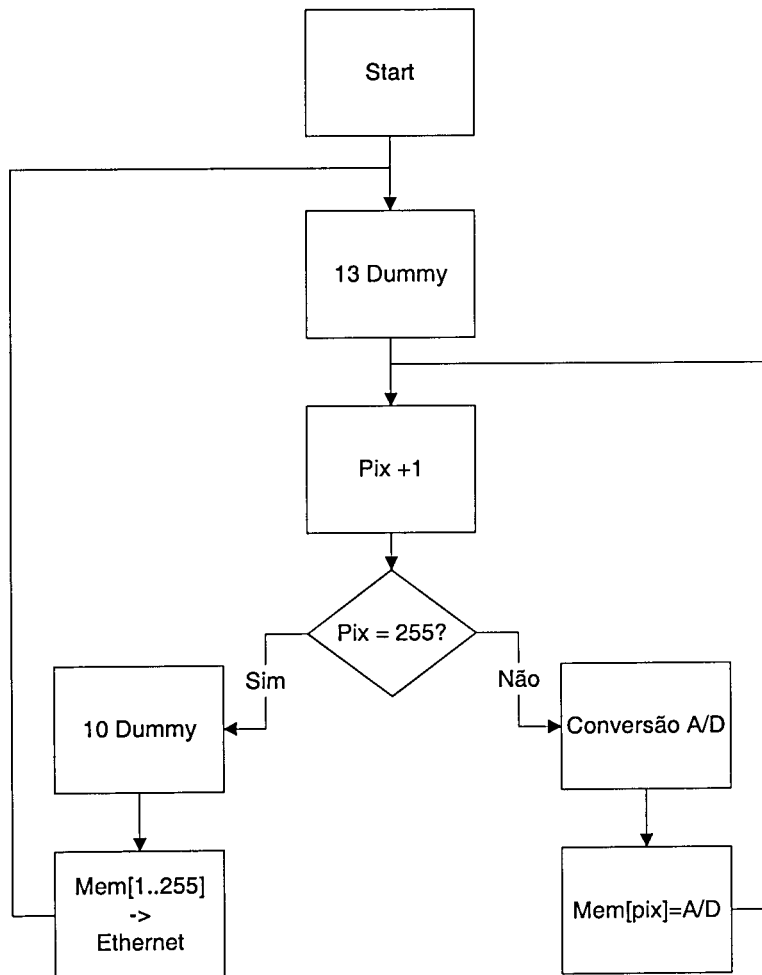


Diagrama 6.1 Algoritmo do microcontrolador

Cada linha é enviada com uma etiqueta no primeiro pixel, indicando o número da linha que está a ser enviada. O microcontrolador incrementa o número da linha desde zero até 110 voltando novamente à linha zero. Assim sendo é possível garantir que nenhuma linha foi perdida durante a transmissão (relembre-se o uso de UDP), para além de ser possível sincronizar a imagem entre o microcontrolador e o PC.

Cada linha do CCD (um pacote UDP) conterá os 255 pixels digitalizados a 8 bits e o primeiro byte de sincronização.

Um exemplo de uma imagem transmitida, indicando os respectivos valores de cada byte, pode ser observada na Tabela 6.1 onde estão representadas as linhas exemplo 100, 101, ..., 109, 110, 0, 1, 2, 3,...

	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	...	...	[254]	[255]
<b>100</b>	100	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255
<b>101</b>	101	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255
<b>...</b>	...	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255
<b>109</b>	109	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255
<b>110</b>	110	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255
<b>0</b>	0	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255
<b>1</b>	1	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255
<b>2</b>	2	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255
<b>3</b>	3	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255
<b>...</b>	...	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255	0..255

Tabela 6.1 Valores dos pixels

O pacote é enviado assim que a linha da imagem adquirida esteja totalmente disponível na memória. Nesse instante, o microcontrolador interrompe a excitação do CCD e inicia um diálogo com o controlador de rede ethernet até lhe transmitir por completo a imagem guardada na memória.

## 6.5 Controlador de rede Ethernet

O circuito integrado RTL8019AS da *Realtek* encontra-se mapeado na posição de memória 0x8300 através do barramento de dados e endereços disponível no microcontrolador. É a partir deste endereço que o microcontrolador coloca na rede a imagem adquirida através de instruções de comando transferidas ao controlador de rede.

Este controlador deverá ser inicialmente configurado, uma vez que será inserido numa rede onde possam transitar pacotes com outros destinos (diferentes IPs) sem que este controlador interrompa o microcontrolador a ele associado.

A velocidade deste controlador é de 10Mbit/s. Na prática a taxa de transferência conseguida é aproximadamente de 2 Mbit/s uma vez que uma linha completa (256 pixels a 8 bits de resolução), ou seja 256 Bytes demoram cerca de 1050  $\mu$ s a serem completamente transferidos para o PC.

## 6.6 Resultados práticos do Hardware

Uma vez desenvolvido e instalado todo o hardware, de uma forma geral, o resultado prático esperado é adquirir uma imagem e ilustrá-la. Foram utilizadas como imagens de testes superfícies de rolhas de cortiça natural, as quais são colocadas a rodar em torno de um eixo de forma a que, linha a linha, seja adquirida toda a sua imagem. O facto desta escolha deve-se à quantidade “infinita” de imagens diferentes que se podem testar, uma vez que é um produto natural, e fácil de colocar a rodar em pouco espaço físico e temporal, uma vez que um pequeno motor DC se encarrega desta tarefa.

A Figura 6.7 ilustra a fotografia de uma rolha enquanto que a Figura 6.8 apresenta a respectiva imagem adquirida e guardada em formato *bitmap*.

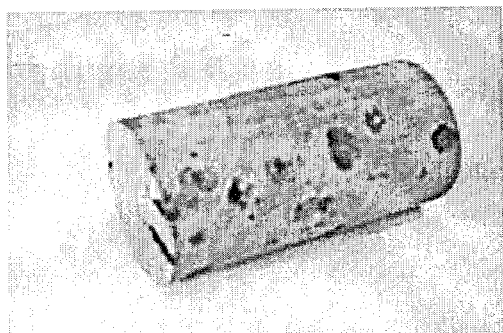


Figura 6.7 Fotografia de uma rolha

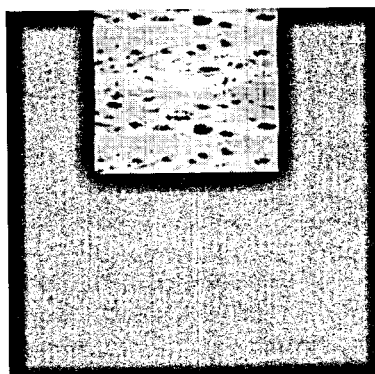


Figura 6.8 Imagem captada de 256x256 pixels com 256 tons de cinzento

Para facilidade de desenvolvimento do software sem obrigação da presença de todo este hardware, foi desenvolvida uma pequena aplicação que simula este hardware e envia, via rede ethernet, os pacotes correspondentes às linhas da imagem. Imagem essa que pode ter origem num ficheiro (*bitmap*) ou inclusive imagens geradas aleatoriamente, com a dimensão e gradientes de intensidade luminosa programáveis. Para além destes factores permite ajustar o tempo de espera entre linhas de forma a ser possível testar mais exhaustivamente o sistema. Assim, esta aplicação poderá estar a executar numa máquina da mesma rede ou no próprio PC onde executa a aplicação principal.

Encerra-se aqui uma primeira parte do trabalho e dá-se início à segunda que incide

---

essencialmente sobre o desenvolvimento e testes da aplicação responsável pelo processamento de imagem digital.

## 7 Pré-processamento de Imagem Digital

Antes de iniciar o processamento de imagem, deverão ser efectuadas algumas rotinas de pré-processamento com a finalidade de estimar as coordenadas da imagem a processar, compensar eventuais variações na luminosidade e corrigir pixels mal adquiridos (ruído). O processamento de imagem, seguido de um pré-processamento, pode ser descrito genericamente pelo Diagrama 7.1.

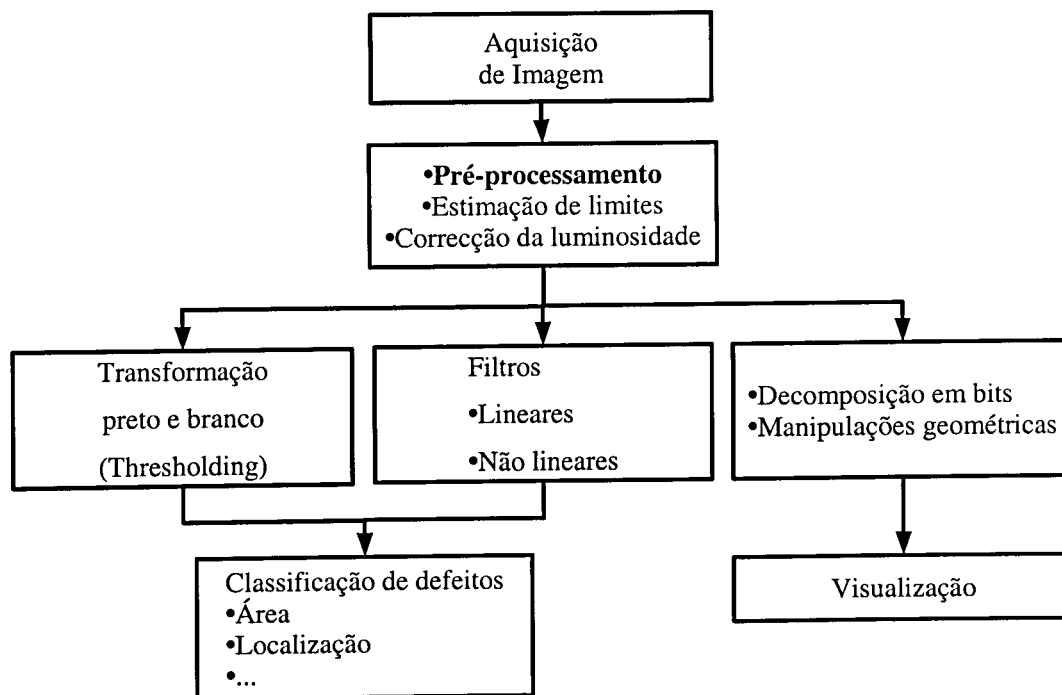
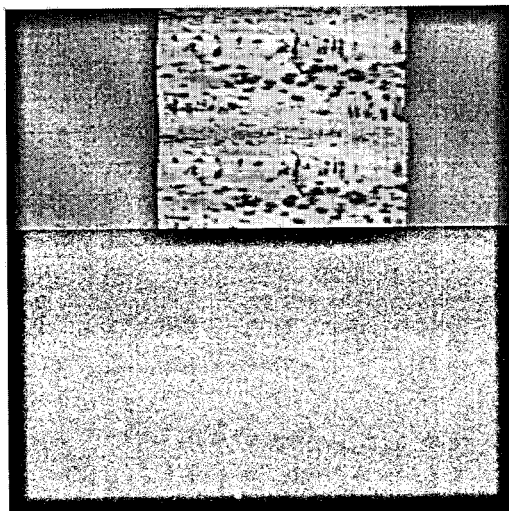


Diagrama 7.1 Pré-processamento e processamento de imagem digital

### 7.1 Delimitações da imagem a processar

Uma vez que a imagem a processar está contida numa área de maior dimensão, torna-se necessário limitar o tamanho da imagem a processar. A Figura 7.1 ilustra uma imagem retirada da câmara, em que deverão ser encontrados os limites horizontais e verticais. O limite vertical não é a fronteira do preto para tons de cinzento, mas sim a linha em que se repete a imagem. Este facto deve-se essencialmente à velocidade de rotação da rolha.



*Figura 7.1 Imagem captada de 256x256 pixels com 256 tons de cinzento*

Escolher criteriosamente os limites da imagem a processar é fundamental uma vez que um erro neste ponto poderá dar origem a um erro de dimensões e/ou defeitos caso a dimensão atribuída seja maior.

Partir-se-á do princípio que a imagem a tratar está contida num rectângulo. Caso contrário seria necessário uma correcção geométrica de forma a transformar a imagem adquirida num rectângulo.

### 7.1.1 Detecção dos limites horizontais.

Neste caso, pretende-se encontrar duas colunas, indicando uma o início da rolha e a outra o final desta. A primeira informação que este dado fornece é o comprimento da rolha que poderá ser calculado pela diferença entre ambas as colunas.

A detecção dos limites horizontais é efectuada linha a linha através da comparação com um valor pré-definido. Este valor permite distinguir os pontos pertencentes ou não à superfície da rolha. Linha a linha é detectada a transição de início e de fim da rolha (preto para cinzento da esquerda para a direita e da direita para a esquerda respectivamente).

Cada linha votará duas colunas como preferenciais para o início e fim da superfície. No final as colunas eleitas serão as mais votadas. Assim conseguem-se determinar defeitos ao topo (defeitos que estão alojados no topo da superfície) e eliminar ruídos (poeiras) que possam existir nas linhas fora da superfície da rolha (zona a escuro).

## 7.1.1.1 Aplicação prática da detecção dos limites horizontais

Um exemplo prático desta funcionalidade a partir de uma imagem adquirida (Figura 7.2) ilustra para além das posições (67 e 192), o comprimento ( $192 - 67 = 125$ ) em pixels.

Uma vez que a distorção produzida pelo sistema óptico é bastante reduzida (não existe distorção em barril), pode-se fazer corresponder cada pixel ao tamanho real em milímetros na superfície da rolha, conhecendo a distância do objecto à lente, e a distância focal desta (Cap. 4.4.1). Assim, é possível apresentar o comprimento da rolha em pixels e em milímetros.

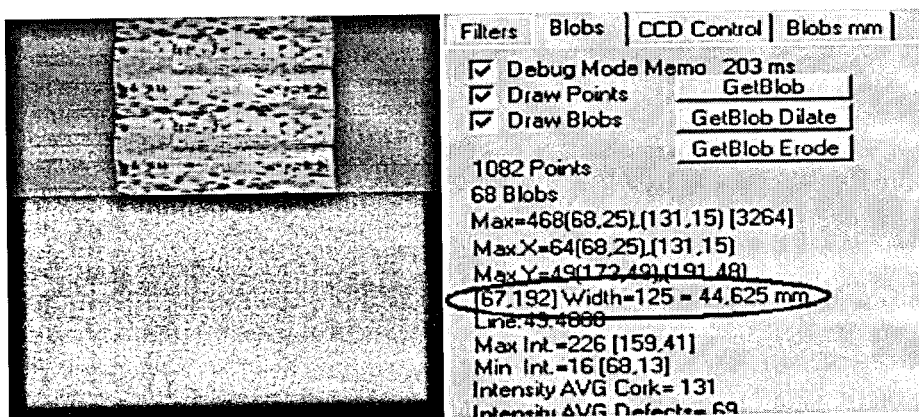


Figura 7.2 Detecção dos limites horizontais

Com o intuito de verificar a variância dos valores encontrados através do algoritmo utilizado, efectuou-se um teste com 256 amostras verificando-se uma exactidão elevada. Estatisticamente, o resultado encontra-se apresentado no Gráfico 7.1 com uma média de 125 pixels (125,1) e um desvio padrão de 0.55 .

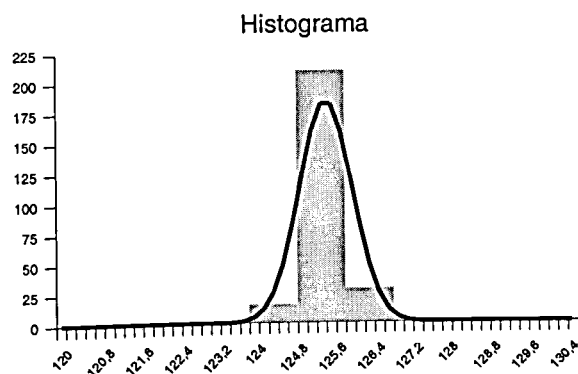


Gráfico 7.1 Histograma da medida do comprimento

### 7.1.2 Detecção de uma rotação completa da rolha (limites verticais)

Uma vez que a velocidade de rotação da rolha não é controlada (de uma forma precisa), não é possível garantir que o número de linhas lidas da imagem da rolha seja constante para uma rotação completa desta. Uma solução passará por controlar a rotação da rolha. Esta solução não é facilmente implementada na indústria (oscilações da tensão e deslizamento da rolha).

Uma outra solução, a escolhida, implica ler um número de linhas superior ao esperado e detectar em qual linha se repete a imagem. Este processamento é efectuado através da comparação das três primeiras linhas com 3 linhas seguidas na imagem. Ou seja, é calculado uma medida de *correlação* entre as três primeiras linhas (consecutivas) e quaisquer outras da imagem. A linha de repetição é determinada a partir do menorante da função descrita na Equação 7.1 em que  $p_{i,j}$  indica o valor do pixel da linha  $i$  na coluna  $j$ . Assim encontra-se a linha cuja medida de correlação é menor, sendo a linha anterior eleita para a última linha da imagem a processar.

$$k(\text{linha}) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^{255} |p_{i,j} - p_{i+\text{linha},j}| \quad (7.1)$$

#### 7.1.2.1 Aplicação prática da detecção de uma rotação completa da rolha

A rolha é colocada a rodar em torno do seu eixo através de um motor DC. Variando a tensão de alimentação deste, a velocidade de rotação variará. Assim é possível variar a velocidade de rotação da rolha, embora de uma forma em malha aberta. Uma possibilidade seria colocar o PC a fechar a malha conhecendo o número de linhas que adquiriram a superfície da rolha na totalidade. Neste caso optar-se-ia por um controlador PI, implementado no código da aplicação do PC e que controlaria a tensão aplicada ao motor. Mas, uma vez que não é este o intuito do projecto, podendo ser um desenvolvimento futuro, é neste caso suficiente variar a velocidade de rotação.

Tomando uma velocidade elevada, (cerca de 1000 rotações por minuto) obtém-se uma rotação completa ao fim de 45 linhas como indicado na Figura 7.3. Na realidade com esta velocidade e com o número de linhas adquiridas (110, por defeito) é quase possível adquirir três

vezes a mesma imagem.

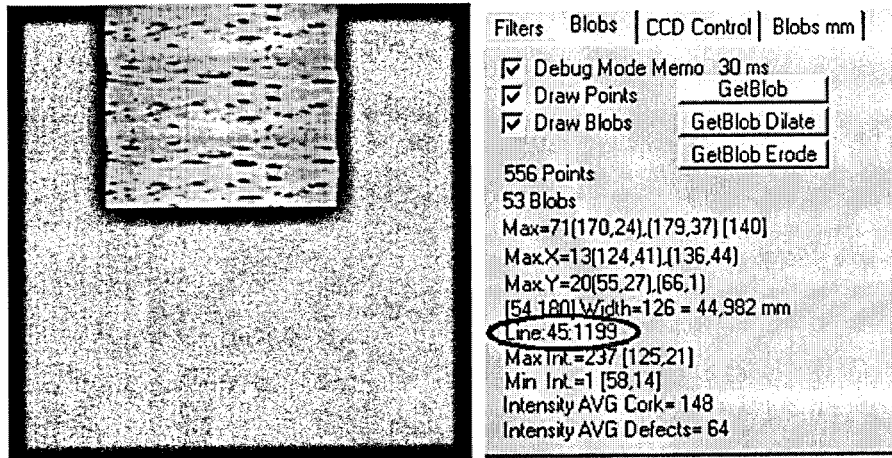


Figura 7.3 Detecção de uma rotação completa da rolha com uma velocidade elevada

No caso da velocidade de rotação diminuir, para cerca de 600 rotações por minuto, o número de linhas necessárias para varrer toda a imagem passa a ser de 70, como indicado na Figura 7.4 (o valor seguinte diz respeito ao  $k$  indicado na Equação 7.1. Neste caso, como é obvio, o mesmo defeito é preenchido por mais pixeis, o que origina uma maior resolução da imagem. Consequentemente, o número de pixeis com defeito aumenta (de 556 para 866), assim como o tamanho na vertical, exemplo do maior defeito que segundo a horizontal se mantém constante (170 a 179) mas segundo a vertical aumenta de 14 para 19. Note-se que o comprimento do máximo defeito horizontal se mantém inalterado (13) embora a sua posição se altere ligeiramente, devido a pequenas inclinações na rolha que a colocam a oscilar. O comprimento do defeito máximo vertical aumenta de 20 para 31. Quanto ao tamanho da rolha, mantém-se inalterado (44,982mm) assim como a posição da rolha (pixeis 54 a 180).

O número de defeitos (denominado por *blobs*) aumenta, uma vez que a resolução é maior originando a visibilidade de alguns pequenos pontos escuros que não eram adquiridos no primeiro caso. As funcionalidades descritas atrás serão posteriormente esclarecidas com maior pormenor.

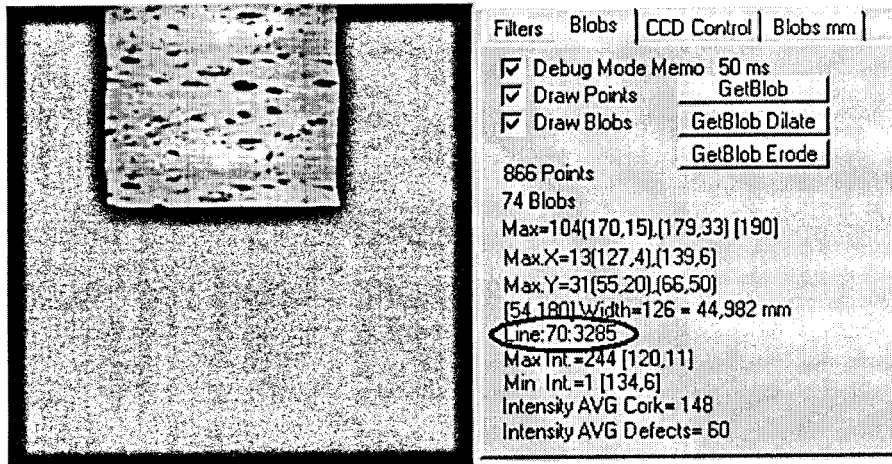


Figura 7.4 Detecção de uma rotação completa da rolha com uma velocidade baixa

Na prática, a imagem (dimensão) a processar terá a forma final indicada na Figura

7.5.

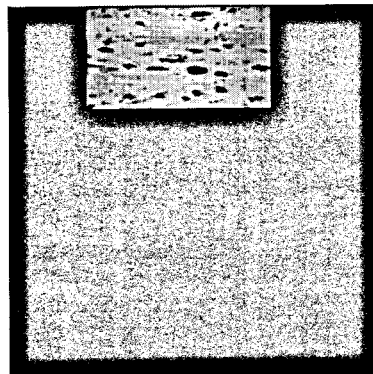


Figura 7.5 Dimensão final da imagem para processamento

## 7.2 Histograma de tons cinzentos

Uma das ferramentas mais simples e eficazes no processamento digital de imagem é o histograma de tons cinzentos que resume o conteúdo de tons cinzentos contidos na imagem [22].

Este histograma é construído, para cada tom de cinzento, contando o número de existências em todos os pixels constituintes da imagem. No final obtém-se um gráfico de barras indicando o número de ocorrências para cada tom de cinzento.

Computacionalmente é um processo simples e relativamente rápido que produz informação importante relativamente à iluminação do objecto cuja imagem foi adquirida. Na realidade, o processamento desta tarefa dependerá do algoritmo usado: uma forma será varrer toda a imagem as vezes necessárias ao número de tons existentes em que se economiza a memória mas o tempo de processamento é brutalmente crescente. Outra forma consiste em criar um vector (normalmente designado por LUT- *lookup tables*) do tamanho do número de tons a contar e varrer uma só vez a imagem incrementando nesse vector a posição desejada.

Teoricamente e sob ponto de vista do processamento digital, uma imagem a preto e branco óptima deverá usar todos os tons de cinzento. E se esta não contiver todos os tons, estes não poderão ser estimados, apenas uma reaquisição poderá solucionar o problema. O que por vezes é possível efectuar é uma *correção de contraste* ou *enriquecimento de contraste* (Cap. 7.3).

### 7.2.1 Histogramas de imagens adquiridas

Uma das funções da aplicação desenvolvida permite visualizar o histograma dos tons de cinzentos existentes na imagem adquirida pela câmara ou pelo ficheiro, previamente criado. Para uma imagem adquirida com uma iluminação adequada, o histograma encontra-se representado na Figura 7.6. Na Figura 7.7 encontra-se a imagem adquirida.

No histograma representado, cada barra encontra-se pintada com o tom de cinzento correspondente à contagem.

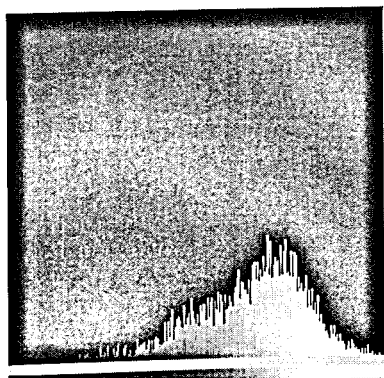


Figura 7.6 Histograma da Figura 7.7

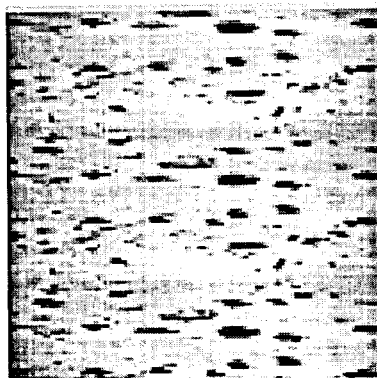


Figura 7.7 Imagem adquirida com boa luminosidade

À medida que a iluminação enfraquece, a imagem ficará menos luminosa e a análise

do histograma permite verificar que a curva definida desloca-se para a esquerda, ou seja, o número de ocorrências de tons escuros aumenta e a de tons claros diminui. Assim, o histograma para uma imagem mais escura está representado na Figura 7.8.

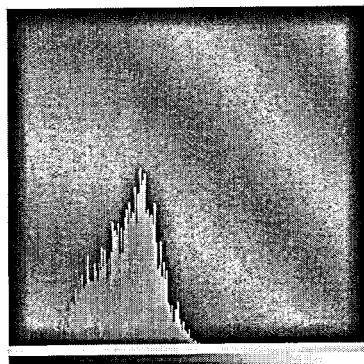


Figura 7.8 Histograma da Figura 7.9

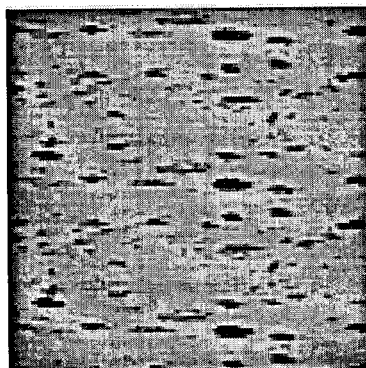


Figura 7.9 Imagem adquirida com luz insuficiente

### 7.3 Correção de variações de luminosidade (enriquecimento de contraste)

Uma característica importante a ser desenvolvida é a imunidade a variações de luminosidade. Assim, o ajuste automático de intensidade luminosa corrige variações e luminosidades inadequadas ao sistema (desde que não sejam atingidos limites de saturação). Para esta função são necessários algoritmos de manipulação de contraste [23].

Normalmente estes algoritmos são usados para o enriquecimento de contraste e, de uma forma geral, são funções que a cada entrada corresponde uma saída. A necessidade de recorrer ao enriquecimento de contraste é devido, na prática, a uma iluminação insuficiente [24].

O cálculo é efectuado pixel a pixel e tipicamente pode ser observado num gráfico de duas dimensões onde se representam todas as entradas possíveis e as respectivas saídas. Estes gráficos são normalmente conhecidos por *mapas de intensidade* [25]. O resultado prático do referido cálculo mantém a forma do histograma, isto é, se o histograma original contém picos e vales, então o histograma final também os terá embora mais afastados.

O mapa de intensidade mais simples é a *cópia*: a saída é igual à entrada e está representado na Figura 7.14.

Um mapa cujo resultado será mais visível é o de *inversão de contraste*. Assim, a saída terá tanto mais brilho quanto menos possuir a imagem original. Este mapa está indicado na Figura 7.15 e sob ponto de vista do histograma, este fica simétrico em torno do seu eixo vertical, como se pode observar nas Figuras 7.11 e 7.13. Note-se que todas as imagens adquiridas e ilustradas adiante, serão apenas restringidas à superfície da rolha, descartando toda a área envolvente.



Figura 7.10 Imagem da superfície de rolha adquirida

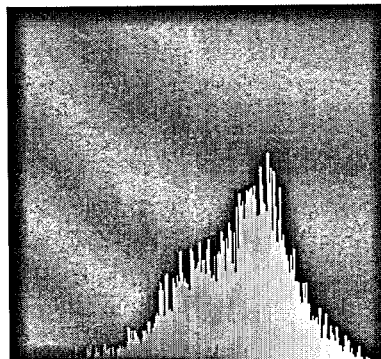


Figura 7.11 Histograma

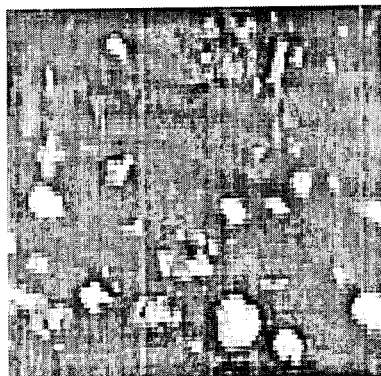


Figura 7.12 Imagem com tons invertidos

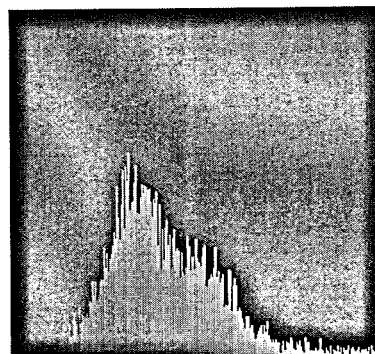


Figura 7.13 Histograma

O mapa de intensidade mais importante é o *Ajuste de brilho* e é responsável pelo *enriquecimento de contraste*<sup>8</sup>. Este mapa (representado na Figura 7.16), no limite, permite efectuar a conversão da imagem a tons de cinzento para preto e branco. Para isso é necessário colocar a recta presente no respectivo mapa na vertical no ponto pretendido para *threshold*.

<sup>8</sup> Devido a uma iluminação pobre que implica uma imagem escura e com pouco contraste, poder-se-à melhorar esta com o enriquecimento de contraste.

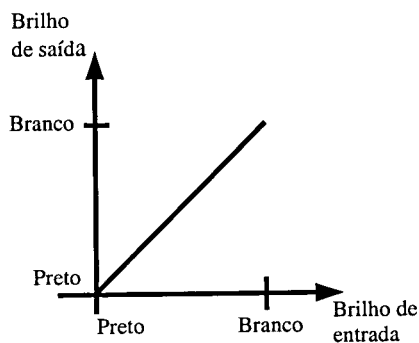
*Cópia*

Figura 7.14 Mapa de intensidade "Cópia"

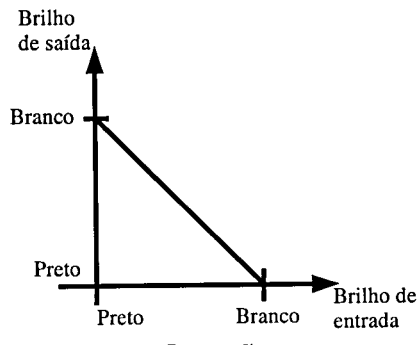
*Inversão de brilho*

Figura 7.15 Mapa de intensidade "Inversão de brilho"

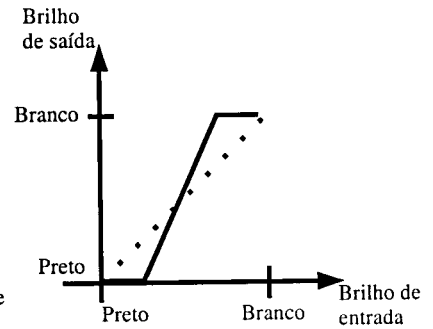
*Ajuste de brilho*

Figura 7.16 Mapa de Intensidade "Ajuste de brilho"

Para efectuar o enriquecimento de contraste, torna-se necessário conhecer apenas o limite mínimo e máximo das intensidades existentes na imagem original. O mapa de intensidade será a recta que intercepta os pontos (mínimo, 0) e (máximo, 255). Na realidade este processamento efectua uma abertura no histograma de luminosidade (*stretch*), e permite corrigir imagens obtidas com uma iluminação deficiente, tipicamente escuras e com pouco contraste.

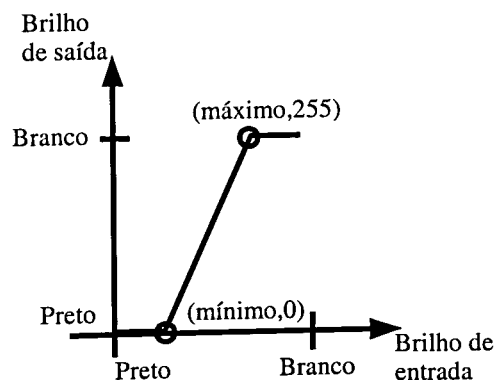


Figura 7.17 Cálculo da recta de ajuste de contraste

O cálculo da recta pode ser efectuado através dos dois pontos conhecidos.

$$\text{declive } m = \frac{255 - 0}{\text{max} - \text{min}} \quad (7.2)$$

$$saída = entrada \cdot m + b \quad (7.3)$$

substituindo num dos pontos conhecidos:

$$0 = min \cdot m + b \quad (7.4)$$

$$b = -min \cdot \frac{255}{max - min} \quad (7.5)$$

assim a equação da recta vem:

$$saída = entrada \cdot \frac{255}{max - min} - min \cdot \frac{255}{max - min} \quad (7.6)$$

### 7.3.1 Aplicação prática da correcção de luminosidade

A correcção de luminosidade é efectuada, caso seja desejado, utilizando o método descrito na equação 7.6. Como resultado prático, é obtida uma nova imagem em que a aparência melhora consideravelmente, mas a resolução de tons de cinzento mantém-se inalterada [24].

Melhorar a resolução apenas é possível recorrendo a uma iluminação mais eficiente, ou até aumentando o ganho do amplificador de vídeo. O facto da resolução não se alterar, e de abrir o histograma (expansão), obriga a que hajam tons que não sejam usados, e consequentemente o novo histograma ficará parecido com um pente cujos dentes variam de tamanho.

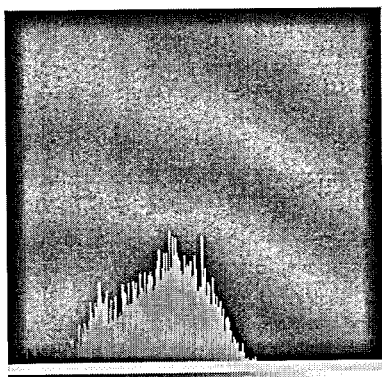


Figura 7.18 Histograma da Figura 7.19

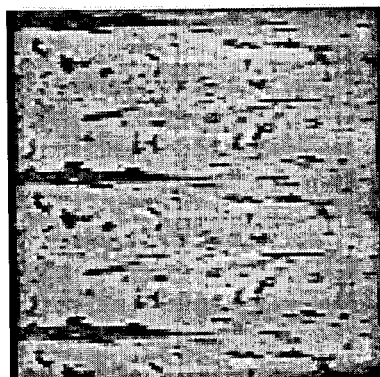


Figura 7.19 Imagem adquirida com fraca luminosidade

Aplicando o algoritmo indicado a uma imagem de uma rocha adquirida com iluminação muito fraca (Figura 7.19), como se pode observar pelo respectivo histograma à esquerda (Figura 7.18), obtém-se o resultado esperado na Figura 7.21. Por motivos de optimização de tempo de processamento, apenas se enriquece o contraste da imagem pertencente aos limites físicos da rocha.

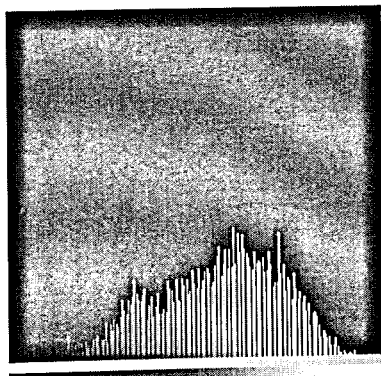


Figura 7.20 Histograma da Figura 7.21

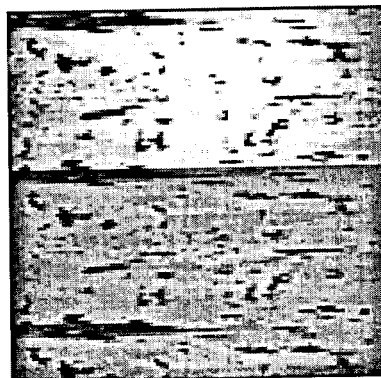


Figura 7.21 Resultado do enriquecimento de contraste da Figura 7.19

Como as imagens adquiridas com pouca luz possuem normalmente o histograma encostado ao lado esquerdo (existem ocorrências de zeros), e para testar o software com imagens cujos limites de máximo e mínimo de intensidades são valores diferentes de 255 e zero respectivamente, foram testadas imagens geradas usando um processo aleatório, simulando uma rocha, de modo a controlar quer os limites físicos da rocha quer os limites de tons usados. A Figura 7.23 indica uma imagem cujo tom mais escuro (mínimo) é de 80 e o mais claro (máximo) de 180.

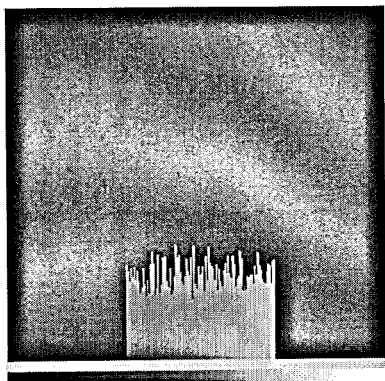


Figura 7.22 Histograma da Figura 7.23

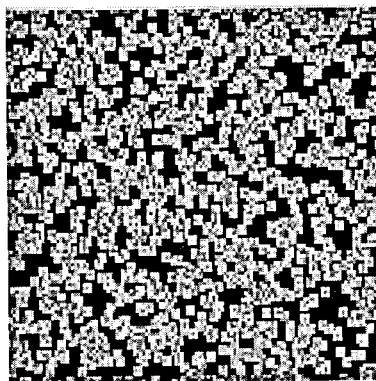


Figura 7.23 Imagem gerada aleatoriamente com tons entre 80 e 180

O resultado encontra-se representado na Figura 7.25.

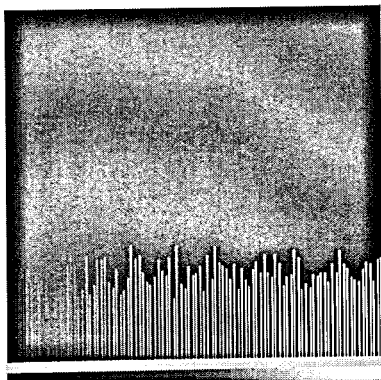


Figura 7.24 Histograma da Figura 7.25

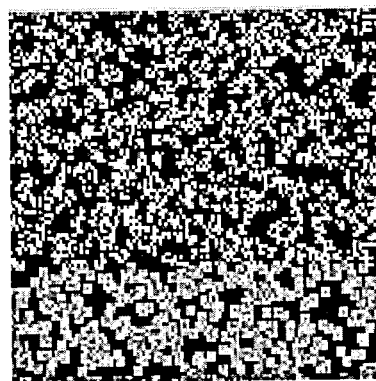


Figura 7.25 Resultado do enriquecimento de contraste da Figura 7.23

Sob ponto de vista de optimização do código, e uma vez que a memória disponível é elevada, deve-se usar neste caso tabelas de apontadores (LUT - *lookup tables*). Ou seja, deve ser criado um vector em que em cada posição (desde o mínimo até ao máximo) sejam calculados os tons finais de modo que efectuar a tarefa final seja apenas apontar um vector e ler o seu conteúdo.

## 8 Processamento de Imagem Digital

O processamento digital de sinal tem estado muito activo na investigação. Hoje em dia, é aplicado em diversas áreas tais como a medicina, a geografia, a astronomia, a militar, a aeronáutica, a astronáutica, a biologia, etc...

Para o processamento de imagem digital torna-se necessária uma imagem 2-D, como função da intensidade luminosa,  $f(m,n)$ , onde  $m$  e  $n$  são as coordenadas espaciais. O valor da função  $f$  em  $(m,n)$  corresponde ao brilho do pixel. Assim, uma imagem de dimensão ( $N$  linhas e  $M$  colunas) pode ser representada como uma matriz 2-D (Equação 8.1).

$$f(m,n) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,M-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & f(N-1,M-1) \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

Uma vez que os computadores apenas podem processar imagens digitais, e para se obter uma imagem digital torna-se necessário efectuar uma digitalização<sup>9</sup>. A digitalização de uma imagem contínua e analógica traduz-se numa perda de informação uma vez que o número infinito de tons e pontos passa a ser limitado [26]. Notar que a digitalização está associada à resolução de tons (número de tons por pixel) enquanto a amostragem está associada à resolução de pixels (número de pontos por imagem).

Do processamento tipicamente resulta uma nova imagem com o mesmo tamanho, mas cujo brilho de cada pixel pode ser alterado. Um exemplo que não deve ser desprezado é, sob o ponto de vista da medicina, o processamento de imagem digital origina informação rápida e adicional que não poderia ser observada pelo olho humano directamente (ex: radiografias, ecografias, eco-doppler, etc.).

### 8.1 Algoritmos de detecção de orlas

Um dos algoritmos mais eficazes para a detecção de orlas (margens de defeitos na imagem) é a convolução bidimensional da imagem inicial por uma máscara (*Mask*: matriz quadrada ou não). Tipicamente a máscara é uma matriz quadrada cujo centro é colocado sobre o

<sup>9</sup> Conversão de uma grandeza analógica em valores digitais

ponto que se pretende calcular. Esta máscara varre todos os pontos da imagem inicial dando origem a uma nova imagem. Este processo poderá ser descrito pela equação 8.3 em que  $O(x,y)$  é a imagem resultado da convolução,  $f(m,n)$  é a imagem inicial e  $Mask(m,n)$  a máscara indicada na equação 8.2 ( para o caso de dimensão 3) [27].

$$Mask(m,n) = \begin{bmatrix} (-r, -r) & (-r, 0) & (-r, r) \\ (0, -r) & (0, 0) & (0, r) \\ (r, -r) & (r, 0) & (r, r) \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

$$O(x,y) = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r f(x-m, y-n) \cdot Mask^T(m,n) \quad (8.3)$$

De facto, a convolução é genericamente a combinação de um pixel com a sua vizinhança. A matriz  $Mask$  transposta varre toda a imagem final, e o resultado do pixel em causa é calculado através do somatório do produto dos pontos adjacentes como indicado na Figura 8.1. Por vezes a matriz  $Mask$  é conhecida por resposta impulsional, ou seja, caso a imagem de entrada seja constituída por apenas um pixel, a resposta será idêntica à matriz  $Mask$ .

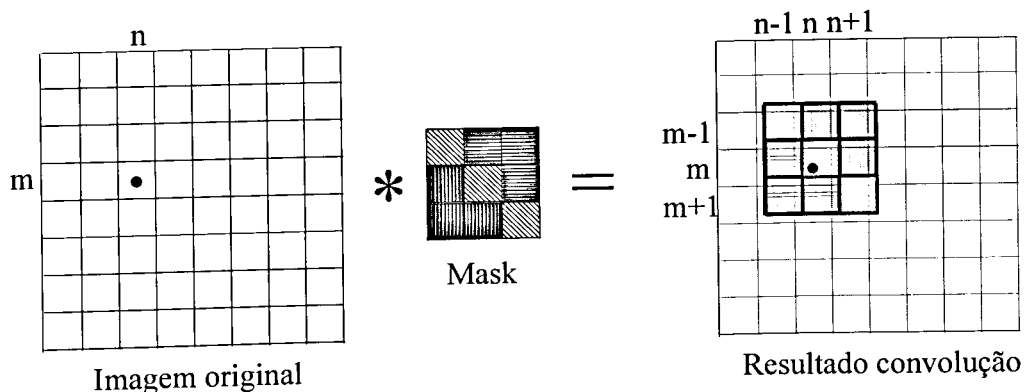


Figura 8.1 Convolução 2-D

### 8.1.1 Respostas impulsionalis típicas para a convolução 2-D

Existem várias matrizes de resposta impulsional ( $Mask$ ) para várias soluções

pretendidas como a eliminação de ruído, detecção de transições horizontais e/ou verticais, etc. Algumas serão apresentadas, embora grande parte poderá ser consultada em [28].

A forma de eliminar ruído será efectuar uma média, para cada pixel dos pixels vizinhos (tipo filtro passa-baixo [29]). Assim, uma resposta impulsional capaz de efectuar a limpeza de ruído é por exemplo indicada na Equação 8.4.

$$Mask(m, n) = \frac{1}{9} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

$$Mask(m, n) = \frac{1}{10} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.5)$$

Outros filtros de média, podem ser criados genericamente através de Equação 8.6.

[29]

$$Mask(m, n) = \left[ \frac{1}{b+2} \right]^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & b & 1 \\ b & b^2 & b \\ 1 & b & 1 \end{bmatrix} \quad (8.6)$$

Quanto aos filtros dedicados à detecção de transições, foram definidos, entre outros, por Sobel, Prewitt, etc. Este tipo de filtros exige, normalmente, uma direcção sobre a qual se pretende realçar as transições. Assim, para os autores referidos estão indicadas respostas impulsionais para a detecção de gradientes em linhas e colunas na Tabela 8.1 [28].

Nestes casos, são detectadas as variações de branco para preto da esquerda para a direita e de baixo para cima. Similarmente podem-se alterar as matrizes, efectuando um espelho sobre elas, de forma a detectar as variações contrárias.

Autor	Gradiente em linha	Gradiente em coluna
Prewitt	$\frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
Sobel	$\frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$

Tabela 8.1 Máscaras de Prewitt e Sobel (linhas e colunas)

Para a detecção de transições quer segundo linhas quer segundo colunas poderá ser usada a resposta impulsional Laplaciana. Esta resposta é zero se os pixels da imagem são constantes ou variam linearmente e toma a forma indicada na Equação 8.7 [30].

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (8.7)$$

A *Máscara* que dá origem a esta função pode ser representada na Equação 8.8

$$Mask = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

Assim, a resposta Laplaciana, que detecta transições segundo ambas direcções horizontais e verticais pode ser representada na Equação 8.9 [30].

Neste caso, os defeitos cujo centro é mais claro são favorecidos. Uma máscara que proporciona o caso simétrico está representada na Equação 8.10.

$$Mask Lap = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.9)$$

$$\text{Mask Lap} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

### 8.1.1.1 Resultados práticos de respostas impulsiais típicas

O resultado prático das operações Sobel, Prewitt e Laplaciana consiste em realçar na imagem as variações idênticas à resposta impulsional, ou seja que possuem a mesma forma.

Como imagens sujeitas aos vários testes foram consideradas imagens adquiridas pelo sistema (rolhas) e um desenho de uma banda desenhada respectivamente nas Figuras 8.2 e 8.3.

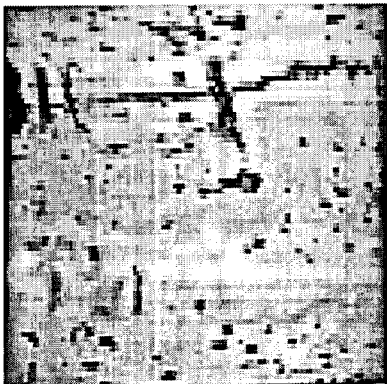


Figura 8.2 Imagem de teste

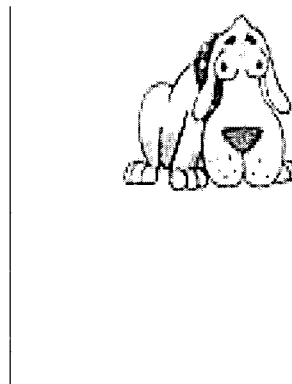


Figura 8.3 Imagem de teste

Como primeiro teste efectuado, eliminação de ruído, foi colocado à prova a Equação 8.4. Os resultados encontram-se apresentados nas Figuras 8.4 e 8.5.



Figura 8.4 Aplicação da convolução à Equação 8.4

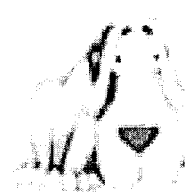


Figura 8.5 Aplicação da convolução à Equação 8.4

É certo que alguns pontos tendem a desaparecer, mas o facto é que a imagem final

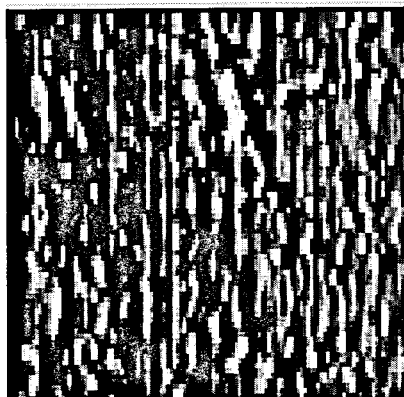
tem um aspecto de imagem baça, ou até mesmo transmite uma ideia de pouca definição. Na realidade, usando a Equação 8.6 para valores de  $b$  elevados (maiores que aproximadamente 8) podem-se obter filtros que não “embaciem” a imagem demasiado, embora seja inevitável que este facto aconteça: afinal é pretendido suavizar a imagem! Mas por outro lado, o facto de  $b$  ser elevado, acarreta a pouca alteração na imagem e praticamente indistinguível pelo olho humano.

Outro dos testes fundamentais, será a convolução pela máscara determinada por Sobel e Prewitt. Na prática, a diferença entre ambas as aplicações das respectivas máscaras é mínima, e por vezes não distinguível à vista humana desarmada, como ilustrado nas Figuras 8.6 a 8.9 pela rolha da Figura 8.2 e nas Figuras 8.10 a 8.13 pela imagem da Figura 8.3

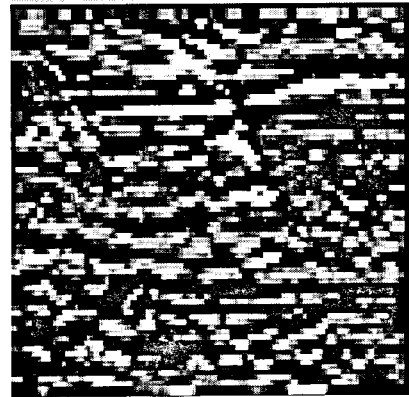
*Detecção gradiente linhas*

*Detecção gradiente colunas*

*Prewitt*

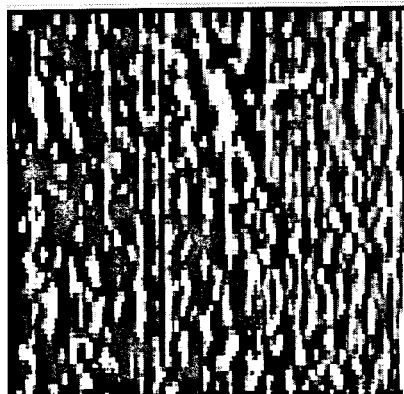


*Figura 8.6 Convolução Prewitt*

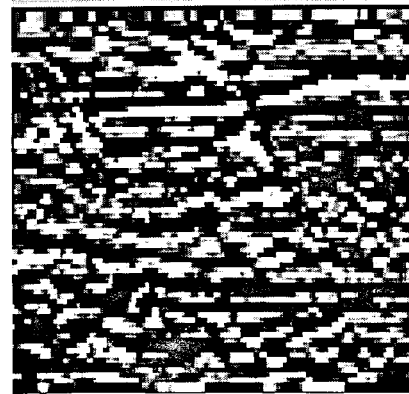


*Figura 8.7 Convolução Prewitt*

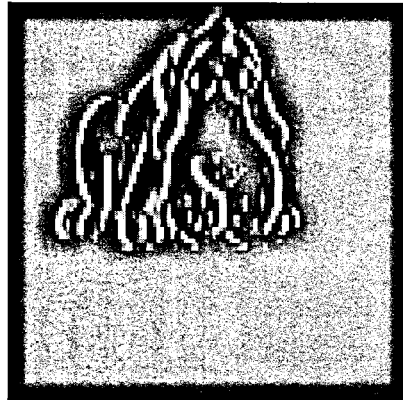
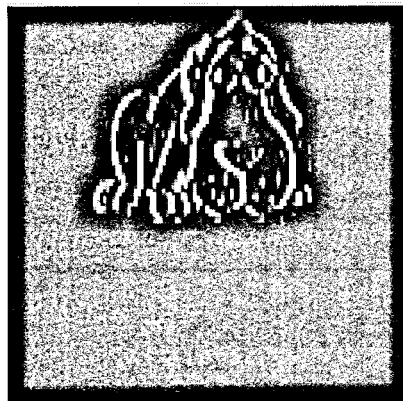
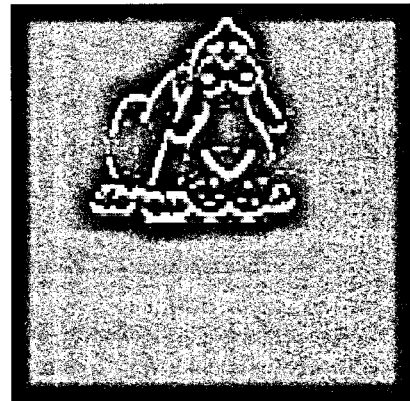
*Sobel*



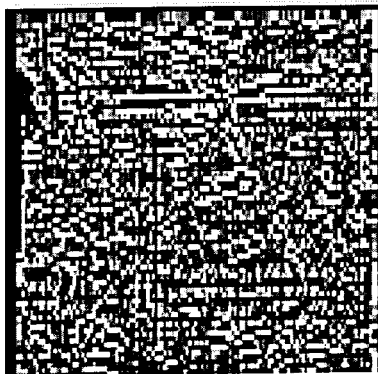
*Figura 8.8 Convolução Sobel*



*Figura 8.9 Convolução Sobel*

*Detecção gradiente linhas**Detecção gradiente colunas**Prewitt**Figura 8.10 Convolução Prewitt**Figura 8.11 Convolução Prewitt**Sobel**Figura 8.12 Convolução Sobel**Figura 8.13 Convolução Sobel*

De facto, pela análise das figuras anteriores, a diferença entre os resultados obtidos por Prewitt e Sobel é mínima.

*Figura 8.14 Laplaciana da Figura 8.2**Figura 8.15 Laplaciana da Figura 8.3*

Por fim, o último teste será a resposta Laplaciana cuja máscara está indicada na Equação 8.9 e que efectuada a convolução pelas imagens de teste apresentadas nas Figuras 8.2 e 8.3 que originam as Figuras 8.14 e 8.15. A convolução indicada (Laplaciana) permite detectar

variações em todos os sentidos, desde que no centro sejam tons de maior intensidade. Uma máscara semelhante poderá ser aplicada dando origem à detecção simétrica, ou seja tons de menor intensidade no centro. A máscara capaz de efectuar esta tarefa está indicada na Equação 8.11 e o resultado da convolução pelas imagens de teste (Figuras 8.2 e 8.3) estão indicadas nas Figuras 8.16 e 8.17.

$$Mask Lap = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

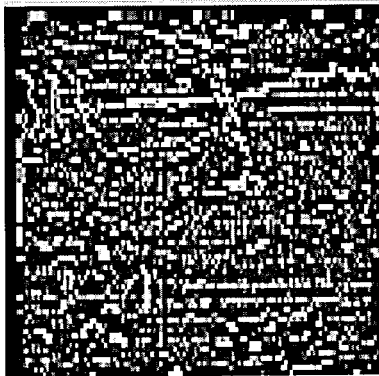


Figura 8.16 Convolução Laplaciana

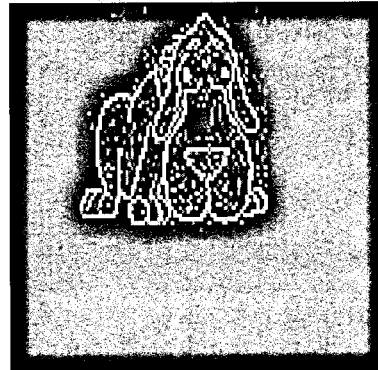


Figura 8.17 Convolução Laplaciana

Para cada caso de estudo que se pretende efectuar, existe uma máscara associada, e que devolve o resultado pretendido. Apenas se torna necessário efectuar a convolução da imagem pela máscara.

O método indicado, convolução com a máscara pretendida, torna-se uma ferramenta importante e potente para o processamento de imagem digital. Note-se que de um método fácil e linear, se consegue criar uma nova imagem realçando os aspectos pretendidos numa imagem. A este cálculo poderão ser adicionados algoritmos que serão tratados adiante e que permitem um processamento mais eficaz e até mesmo com outras funcionalidades.

## 8.2 Binarização (thresholding)

A operação de binarização, tipicamente conhecida por *thresholding*, consiste em seleccionar pixels, os quais têm valores particulares, ou que pertençam a uma determinada gama

definida. O processo mais utilizado (*uniform thresholding*) consiste em comparar os valores da imagem original com um certo patamar definindo o tom branco para valores maiores que o patamar e o tom preto para valores inferiores ao patamar. Assim, uma imagem com tonalidades é transformada em preto e branco. A dificuldade normalmente reside na escolha do patamar. Se os tons usados por um objecto forem conhecidos e diferentes do fundo da imagem, este processo poderá ser eficaz para isolar o objecto. Neste caso, e sob ponto de vista do histograma, a escolha

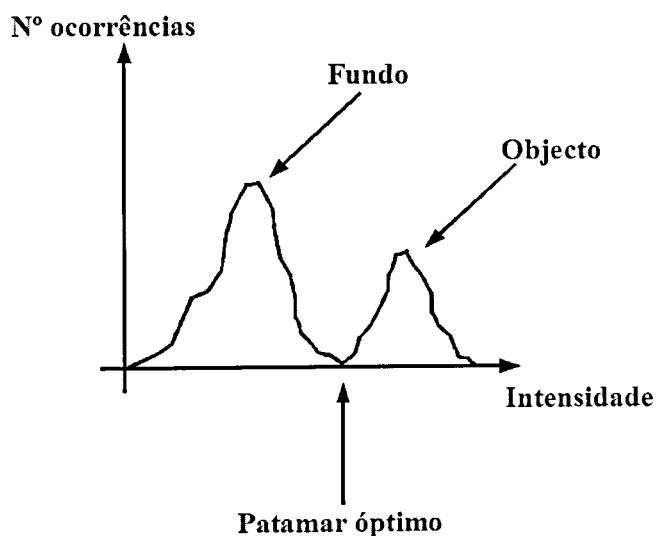


Figura 8.18 Histograma

seria simples, como indicado na Figura 8.18. Mas na prática por vezes esta separação de tons não é possível uma vez que tons do objecto coincidem com os tons do fundo. Neste caso podem ser usadas técnicas avançadas como é o caso do *thresholding óptimo*. O mais conhecido é o método de *Otsu* [31].

### 8.2.1 Aplicação da Binarização

No caso concreto de aquisição de imagens de superfícies de rolhas, o nível de *threshold* varia directamente com a iluminação. Ou seja, se a iluminação incidente na superfície da rolha baixar ligeiramente, após o processo de binarização resultam muitos mais defeitos na mesma superfície. Uma das soluções, não cem por cento eficaz, mas que poderá resolver em parte o problema consiste em previamente efectuar um enriquecimento de contraste (Cap. 7.3). Assim cria-se uma maior imunidade às variações exteriores de luminosidade.

## 8.2.2 Resultados da Binarização

Com a finalidade de comparar o resultado do método de enriquecimento de contraste antes da binarização foram efectuados três testes.

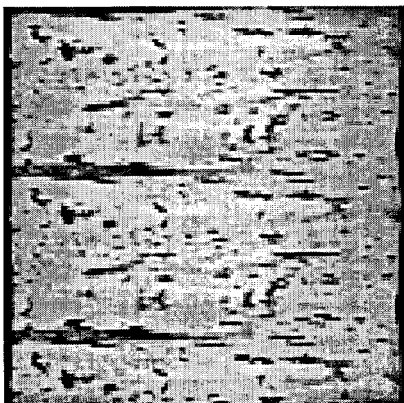


Figura 8.19 Imagem de teste

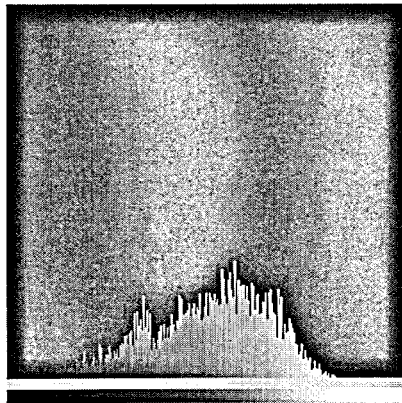


Figura 8.20 Histograma

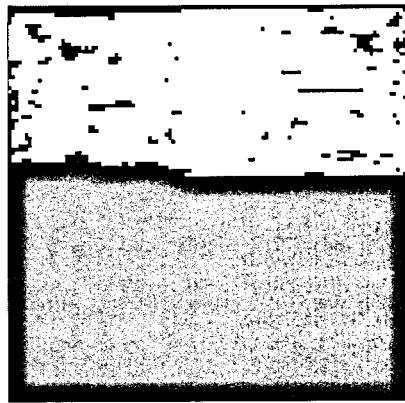


Figura 8.21 Binarização

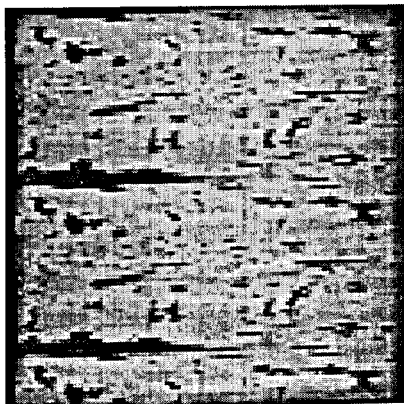


Figura 8.22 Imagem de teste (a 80% de luz)

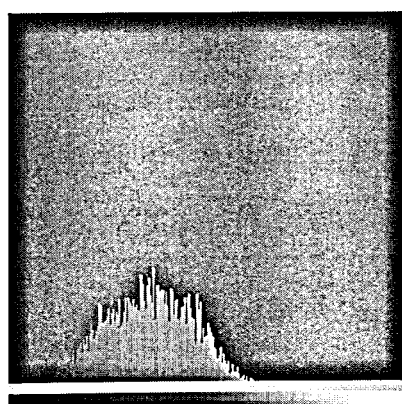


Figura 8.23 Histograma

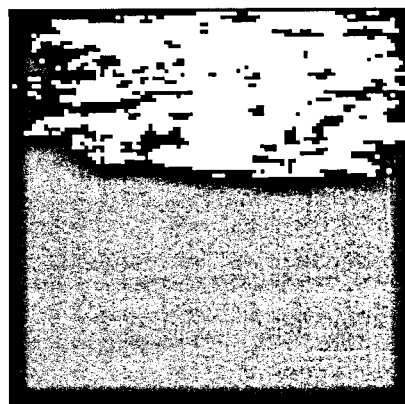


Figura 8.24 Binarização

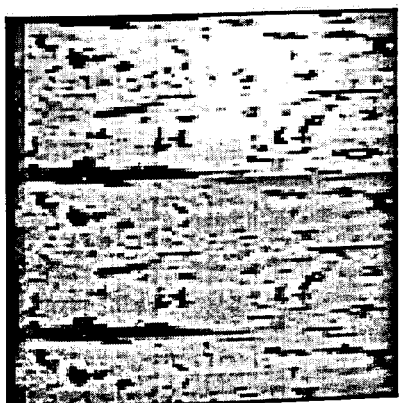


Figura 8.25 Imagem de teste (redução de luz + enriquecimento)

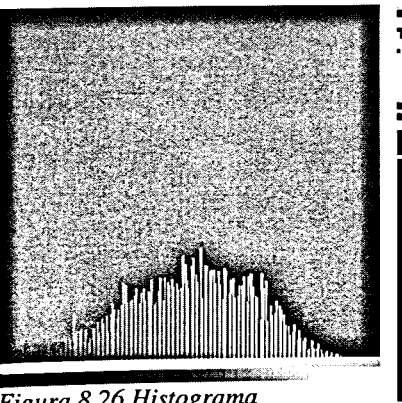


Figura 8.26 Histograma

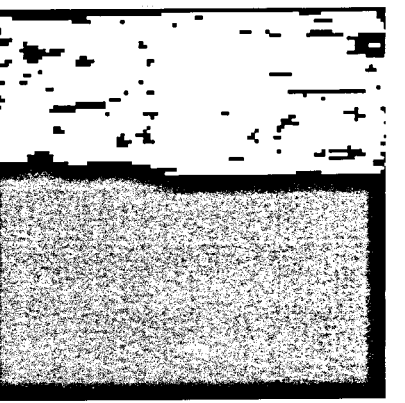


Figura 8.27 Binarização

Testes estes que foram compostos por uma imagem original (Figura 8.19), pela mesma imagem mas com uma redução de vinte por cento da intensidade luminosa (Figura 8.22) e

finalmente com o respectivo enriquecimento de contraste (Figura 8.25). A binarização foi efectuada com uma referência de *threshold* de 77 para todos os casos. Para além do aspecto visual que se pode observar nas Figuras 8.21, 8.24 e 8.27, foram efectuadas algumas medidas em ambas imagens. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.2.

	Nº pixeis defeituosos	Nº defeitos isolados <sup>10</sup>
Imagem original	729	52
Imagem escurecida a 20%	2017	40
Imagem escurecida a 20% + enriquecimento de contraste	696	51

*Tabela 8.2 Resultados dos defeitos encontrados*

Comparando a imagem original com a escurecida e enriquecida, a alteração do número de pixeis defeituosos foi de 4.5%, e o número de defeitos encontrados isolados foi de 2%, o que leva a concluir que a binarização efectuada após o enriquecimento de contraste é bem sucedida, originando assim uma imunidade às variações de luminosidade exterior.

---

<sup>10</sup> Através do algoritmo de detecção de defeitos descrito no Capítulo 8.5

## 8.3 Processamento Morfológico de Imagem Digital

O processamento morfológico de imagem digital é um tipo de processamento em que a estrutura e/ou forma de uma imagem original é alterada [32]. Por vezes este tipo de processamento pode ser considerado como pré-processamento uma vez que rotinas de eliminação de ruído, ligação ou separação de objectos são o fruto do processamento morfológico.

Como principais operações definem-se a erosão<sup>11</sup> e dilatação<sup>12</sup> [33].

Na erosão, um objecto “emagrece” uniformemente em toda a sua volta enquanto que na dilatação, um objecto cresce uniformemente, expandindo-se. Existem ainda outras operações que são constituídas pela erosão e dilatação, como é o caso da abertura e fecho de uma imagem. Normalmente considera-se uma imagem que contém um objecto escuro num fundo claro. Caso o sistema seja inverso, poder-se-à inverter os tons da imagem, ou alterar as Equações 8.12 e 8.13.

### 8.3.1 Erosão e Dilatação

A *erosão* consiste em eliminar todos os pontos limites dos objectos constituintes da imagem, dando origem a novos pontos limites e objectos mais pequenos, em todo o seu perímetro. De facto, a nova imagem conterà mais pontos “claros” uma vez que o algoritmo da erosão da imagem  $X(x,y)$  pode ser descrito pela Equação 8.12 dando origem à imagem final  $Y(x,y)$ , em que  $\delta$  é o número de pixeis da vizinhança.

$$Y(x, y) = \text{MAX}_{\delta=1} [X(x,y)] \quad (8.12)$$

Ou seja, a nova imagem é construída analisando ponto a ponto o maior da sua vizinhança. É certo que se dois objectos estão ligados por um ou dois pixeis, uma iteração da erosão faz cortar esta ligação. Para que após uma iteração do referido algoritmo a ligação não se desfaça, é necessário que estejam pelo menos três pixeis responsáveis pela ligação. Como é natural, sob ponto de vista do histograma de tons de cinzentos, a erosão faz aumentar o número de ocorrências de tons mais claros e diminuir as ocorrências de tons escuros.

Tipicamente a erosão é usada para remover, da imagem original, objectos pequenos

<sup>11</sup> Fenómeno idêntico à erosão da natureza: corroer, aplanar ou desgastar.

<sup>12</sup> Aumento de volume, expansão, distender-se.

que não possuem qualquer interesse para um posterior processamento [34].

A *dilatação* tem como objectivo, “engordar” os objectos, incorporando os pixels vizinhos, que pertencem ao fundo da imagem, ao próprio objecto. Se o objecto for circular, aumenta a sua área de dois pixels (diâmetro) por cada iteração da dilatação. Se dois objectos se encontrarem separados por um ou dois pixels, serão ligados pelo referido algoritmo que é um dos casos práticos para o uso deste algoritmo. Outro caso será o de preencher “buracos” que possivelmente possam aparecer no interior de um objecto [34]. O algoritmo que descreve a dilatação está indicado na Equação 8.13. Naturalmente que, ao contrário da erosão, sob ponto de vista do histograma de tons cinzentos, existirão mais ocorrências para tons escuros.

$$Y(x, y) = \text{MIN}_{\delta=1} [X(x, y)] \quad (8.13)$$

Estes algoritmos apresentam normalmente a vantagem de eliminar pequenas falhas fruto de ruído ou erro durante a aquisição da imagem.

### 8.3.2 Abertura e Fecho

Jogando com os algoritmos erosão e dilatação, conjugando-os, poder-se-à obter dois novos processos denominados fecho e abertura de uma imagem. O Diagrama 8.1 ilustra de uma forma clara o princípio dos algoritmos referidos, em que a abertura de uma imagem é conseguida através de erosão seguida da dilatação, enquanto que o fecho é conseguido através da dilatação seguida da erosão [35].

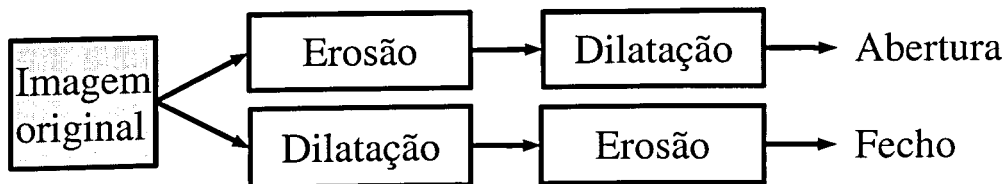


Diagrama 8.1 Abertura e Fecho de uma imagem

A abertura tem como principal objectivo eliminar objectos pequenos e estreitos, enquanto que o fecho tem como principal objectivo o preenchimento de pequenos buracos nos objectos. Por vezes aquando da binarização (*thresholding*) de uma imagem, surgem pontos

isolados que podem ser tratados utilizando os algoritmos indicados [35].

### 8.3.3 Resultados práticos – Erosão e Dilatação

Como imagens de teste foram adoptadas as Figuras 8.28 e 8.30 cujos respectivos histogramas estão representados ao lado (Figuras 8.29 e 8.31).



Figura 8.28 Imagem de teste

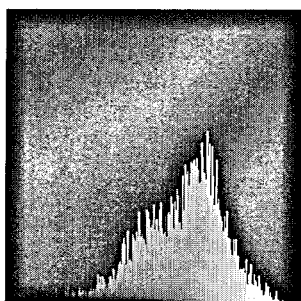


Figura 8.29 Histograma

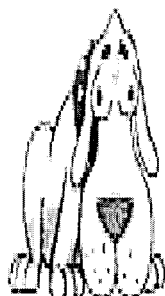


Figura 8.30 Imagem de teste

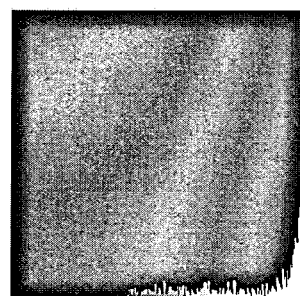


Figura 8.31 Histograma

#### *Erosão*

Imagem processada

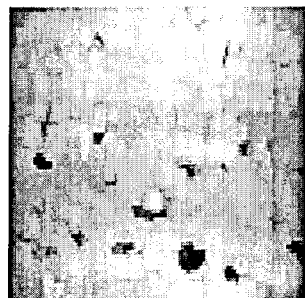


Figura 8.32 Erosão

Histograma

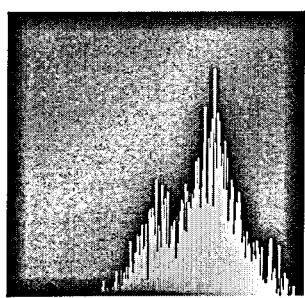


Figura 8.33 Histograma

#### *Dilatação*

Imagem processada

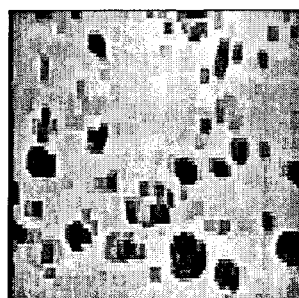


Figura 8.34 Dilatação

Histograma

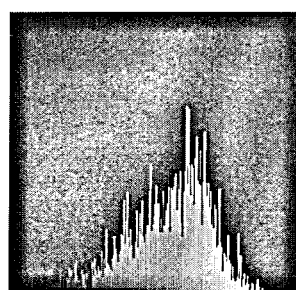


Figura 8.35 Histograma

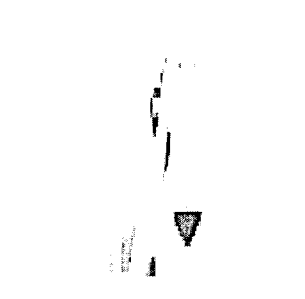


Figura 8.36 Erosão

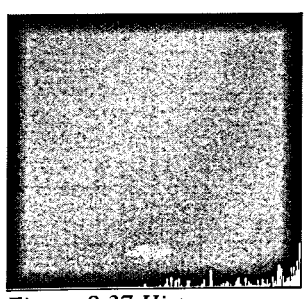


Figura 8.37 Histograma

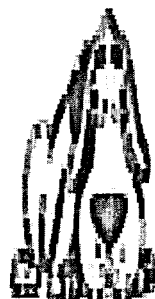


Figura 8.38 Dilatação

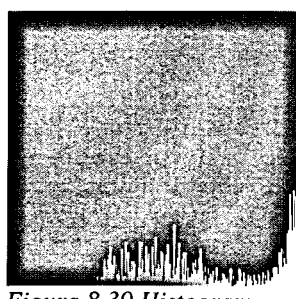
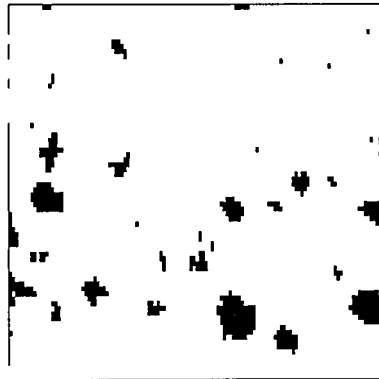


Figura 8.39 Histograma

De facto, a distribuição do histograma altera-se conforme a operação de erosão ou dilatação como previsto. No caso em que existem linhas definidas com poucos pixels de

espessura, e no caso de ser efectuada uma erosão estas praticamente desaparecem, como é o caso da Figura 8.36.

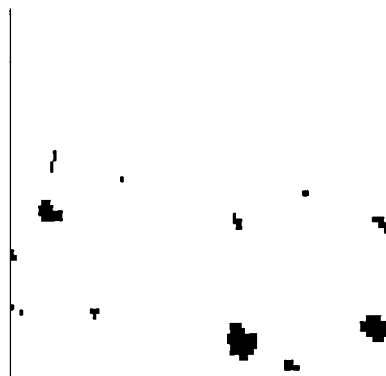
Muitas vezes são utilizados estes algoritmos mas apenas em dois tons (Preto e Branco). Aplicando uma binarização à Figura 8.28 obtém-se uma imagem apenas com os defeitos a preto e toda a restante superfície a branco como indicado na Figura 8.40.



*Figura 8.40 Imagem preto e branco de teste*

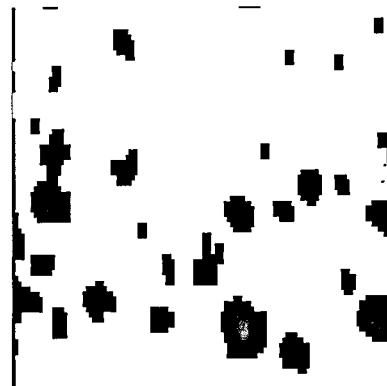
Neste caso torna-se mais visível o efeito das operações erosão e dilatação. Nas Figuras 8.41 e 8.42 estão indicadas as referidas operações.

*Erosão*



*Figura 8.41 Imagem Preto e Branco após Erosão*

*Dilatação*



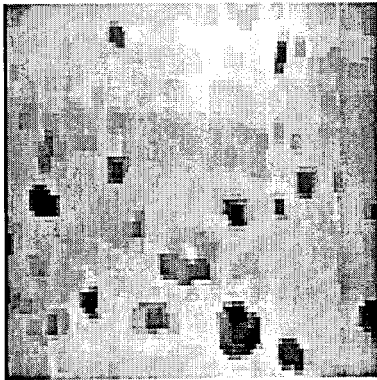
*Figura 8.42 Imagem Preto e Branco após Dilatação*

Principalmente existe um compromisso entre limpeza de ruído e perda de informação no caso da erosão e um realce do objecto comprometido com um aumento de ruído. A variação da área do objecto também se torna inevitável, o que não acontece no caso da abertura ou fecho da imagem, daí as vantagens do seu uso.

### 8.3.4 Resultados práticos – Abertura e Fecho

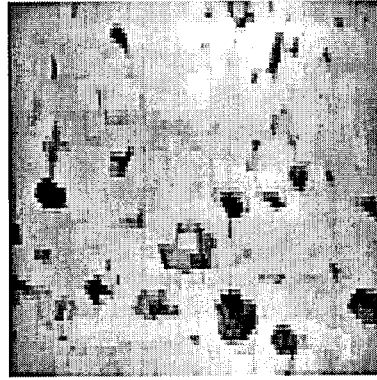
Na abertura e fecho de uma imagem também serão mais elucidativas as imagens a preto e branco. Mas, inicialmente serão apresentadas as imagens com tons de cinzento. Para imagens de teste foram usadas as mesmas que no caso da erosão e dilatação, ou seja as Figuras 8.28 e 8.30 cujos respectivos histogramas estão representados ao lado (Figuras 8.29 e 8.31). As imagens depois do processamento encontram-se representadas nas Figuras 8.43 a 8.46.

*Imagem processada: Abertura*



*Figura 8.43 Imagem processada: Abertura*

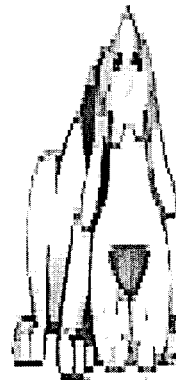
*Imagem processada: Fecho*



*Figura 8.44 Imagem processada: Fecho*



*Figura 8.45 Imagem processada: Abertura*



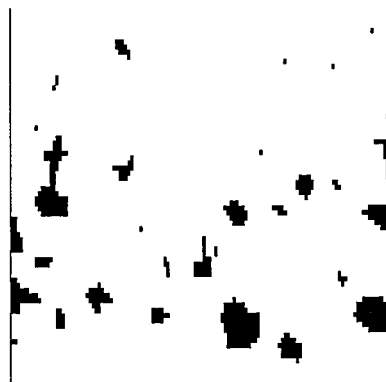
*Figura 8.46 Imagem processada: Fecho*

Uma vez mais acontece a perda de informação necessária: como a abertura é composta pela erosão seguida da dilatação, na primeira são perdidas as linhas que possuem uma espessura inferior a dois pixels. Mas por outro lado é mesmo a função pretendida, eliminar eventuais ruídos. Portanto, um dos cuidados que se deve ter em atenção antes de efectuar uma operação de abertura, é verificar que o objecto que se pretende obter tenha uma espessura igual ou superior a três pixels sob pena de o perder ou perder partes deste.

Fazendo uso de uma imagem a preto e branco para teste, foi considerada a Figura 8.40. O resultado do processamento está indicado nas Figuras 8.47 e 8.48. Neste caso, uma vez mais, torna-se mais elucidativo o processamento de uma imagem a preto e branco.

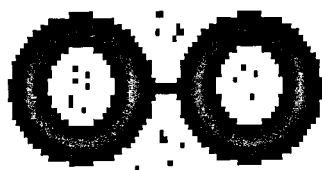
*Abertura*

*Figura 8.47 Imagem processada:  
Abertura*

*Fecho*

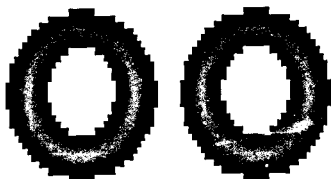
*Figura 8.48 Imagem processada:  
Fecho*

Com o intuito de realçar os pormenores, foram testadas imagens desenhadas incidindo sobre os pontos a testar o algoritmo. Assim, para o algoritmo de abertura, a imagem de teste criada foi a Figura 8.49. Esta contém dois objectos interligados por uma linha cuja espessura é de dois pixels. Para além disso, contém ruído introduzido aleatoriamente.



*Figura 8.49 Imagem de teste para  
Abertura*

Aplicando o algoritmo de abertura à referida imagem obtém-se, como seria de esperar, a eliminação do ruído e a separação dos objectos. O resultado está indicado na Figura 8.50.



*Figura 8.50 Resultado da  
Abertura*

No caso de testar o algoritmo de fecho, foi criada a imagem de teste Figura 8.51 cujas circunferências não se encontram perfeitamente fechadas, e cujas distâncias são de dois pixels. Inclusive existe ruído, agora a branco sobre o objecto.



*Figura 8.51 Imagem de teste ao algoritmo Fecho*

Como se deve esperar, as circunferências deverão ser fechadas, unidas e eliminado o ruído a branco existente. O resultado está indicado na Figura 8.52.



*Figura 8.52 Resultado do algoritmo Fecho*

Os algoritmos de abertura e fecho de uma imagem são bastante importantes uma vez que permitem eliminar eventuais ruídos, erros na aquisição de imagem, sem deturpar muito uma imagem, sob ponto de vista de área. É certo que o seu uso deverá ser sempre cuidadosamente aplicado.

## 8.4 Resolução de tons de cinzento

O número de bits relaciona directamente a resolução de tons de cinzento que a imagem contém. Assim, o número de tons poderá ser escrito como  $2^n$ , em que  $n$  é o número de bits. A escolha de  $n$  acarretará ou a pouca resolução se  $n$  for baixo, ou a necessidade de manipulação de muitos bits, por vezes complicada devido às altas velocidades, caso  $n$  seja elevado. Note-se que, por exemplo, se a velocidade de saída dos pixels (de uma câmara a tons de

cinzento) for de 2 MHz, e a resolução de 16 bits, torna-se necessário fazer aquisição a uma velocidade de 32 Mbit/s. Caso seja uma câmara a cores, torna-se necessário introduzir não a luminância mas sim as componentes R, G e B, que no caso apresentado requeria uma velocidade de aquisição de 96 Mbit/s, cuja solução não é das mais económicas. Por outro lado, o conversor analógico-digital para 16 bits a uma velocidade de aquisição compatível também se torna economicamente “pesado”. A escolha de conversores analógico-digitais de 8 bits tem várias vantagens uma vez que são mais baratos, e o número de bits é facilmente adquirido por qualquer microcontrolador que seja necessário introduzir no sistema de aquisição, para além de que se torna mais simples armazenar uma imagem com resolução de 8 bits. Por estas razões tipicamente o número de bits usado é de 8, ou seja um *byte*.

#### 8.4.1 Resultados da escolha da resolução de tons

A resolução com que é adquirida uma imagem é de um byte, ou seja 256 tons, variando entre o preto (00h – 0000 0000b) e o branco (FFh – 1111 1111b).

A informação contida em cada bit torna-se menos importante à medida que se desloca do bit mais significativo (MSB) para o menos significativo (LSB). Por outro lado, o bit que contém menos informação varia mais rapidamente ao contrário do mais significativo.

Nas Figuras 8.56 a 8.63 estão representados os 8 bits separadamente da imagem original (Figura 8.55). Na realidade, os bits 0 a 3 parecem não conter qualquer informação. Mas, de facto transmitem informação, embora menos que os bits 4 a 7, como se pode comparar pelas Figuras 8.53 e 8.54.

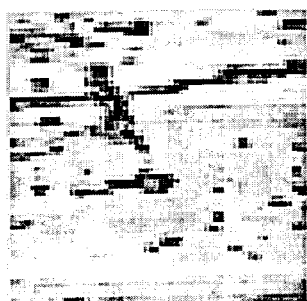


Figura 8.53 Imagem de 8 bits (256 tons)

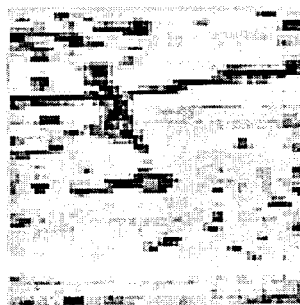


Figura 8.54 Imagem com os 4 bits mais significativos (16 tons)

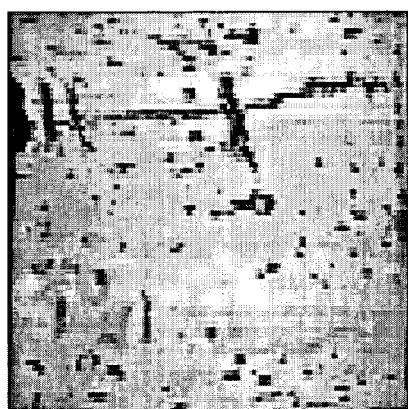


Figura 8.55 Imagem original

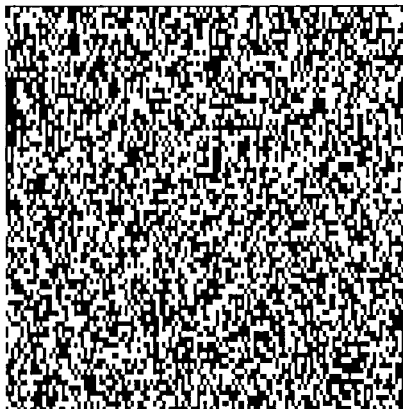


Figura 8.56 Bit 0

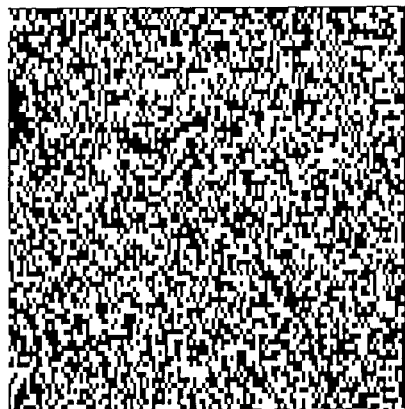


Figura 8.57 Bit 1

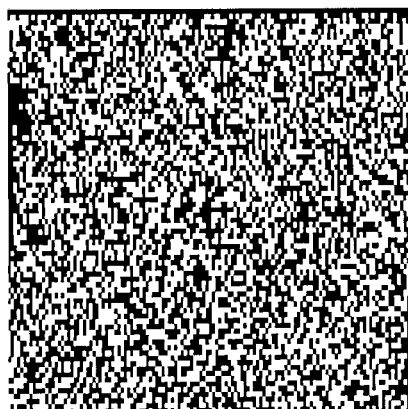


Figura 8.58 Bit 2

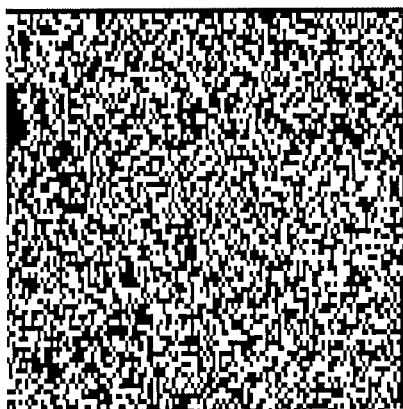


Figura 8.59 Bit 3

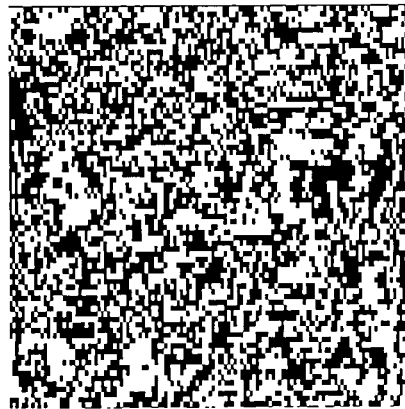


Figura 8.60 Bit 4



Figura 8.61 Bit 5



Figura 8.62 Bit 6

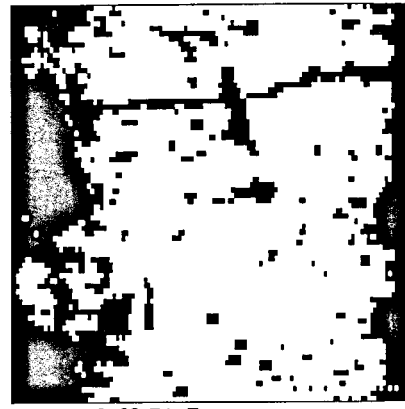


Figura 8.63 Bit 7

## 8.5 Detecção de manchas/defeitos na imagem

Por vezes é necessário conhecer, calculando, o número de pontos pertencentes a um objecto. Poderá ser usado um nível de *threshold*, que define o que é objecto ou não. Mas existem casos em que o objecto poderá estar “distribuído” pela imagem, como é o caso da imagem da superfície de uma rolha, ou o couro natural, matéria prima do revestimento de sapatos, carteiras, sacos de rafia, etc. Nestes casos torna-se necessário conhecer o número de defeitos, a respectiva distribuição, área total, máxima área sem defeitos, etc. Um exemplo prático consiste numa superfície de couro natural, que por vezes contém defeitos, e que será cortada na forma de sapatos. Os defeitos não deverão coincidir nas zonas definidas para sapatos mas sim para rejeitar. A Figura 8.64 ilustra de uma forma simples este problema.

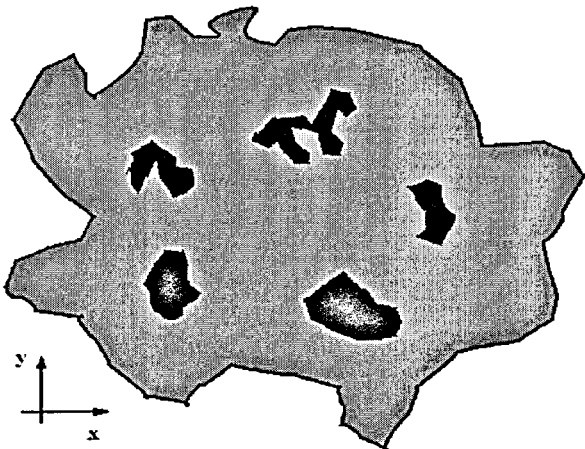


Figura 8.64 Exemplo: Tecido de couro defeituoso

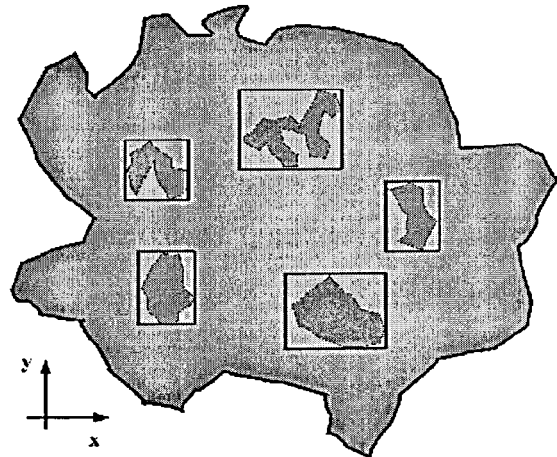


Figura 8.65 Detecção de defeitos

Imagine-se que se pretende conhecer as posições e os pontos de cada defeito para escolher as posições de corte das solas dos sapatos de forma a maximizar o número de solas resultante, ou seja desperdiçando o mínimo possível a matéria prima.

A informação das posições de cada defeito (Figura 8.65) é essencial para um algoritmo de posicionamento dos moldes a cortar (Figura 8.66).

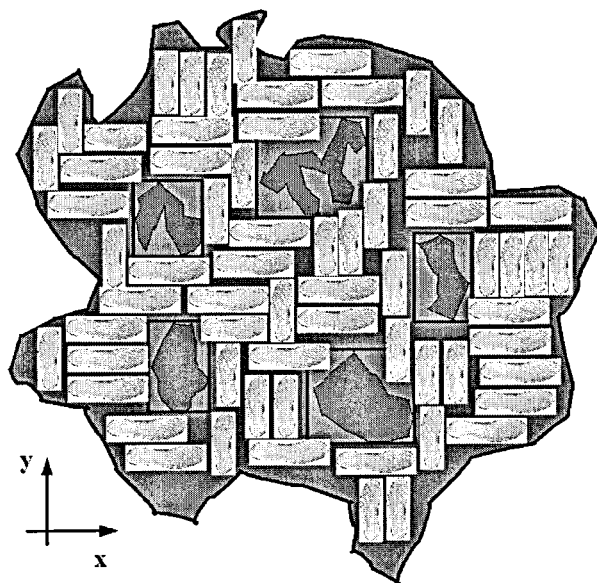


Figura 8.66 Posicionamento do corte fora dos defeitos

Outro exemplo a mencionar está relacionado com a superfície das rochas de cortiça natural e a sua classificação de qualidade. Neste caso, os defeitos devem também ser analisados quanto à área, posição e tipo que ocupam na rocha. Um defeito no meio da superfície não terá tanto problema como o mesmo defeito mas encostado a um topo, onde o líquido entra directamente em contacto. Por outro lado, um defeito que contenha pequena área mas seja sob a forma de uma linha que atravessa a rocha de um topo ao outro, tipicamente denominada fenda, irá proporcionar à rocha uma má vedação.

Deste modo, o algoritmo de detecção de defeitos isolados torna-se crucial em certos casos.

### 8.5.1 Algoritmo

Pretende-se, a partir da imagem capturada de uma rocha, detectar todos os defeitos isolados e para cada defeito indicar uma lista de pontos constituintes e as coordenadas delimitadoras (máximos e mínimos da lista de pontos).

Sob ponto de vista de memória, são necessários três vectores que armazenem elementos do tipo ponto (obrigatoriamente coordenadas  $x$  e  $y$ ). O primeiro, será uma *stack* onde serão guardados os pontos pendentes, que pertencem ao defeito actual, mas cujos vizinhos ainda não foram observados, funcionando como uma pilha *filo – first in, last out*. Outro vector será

constituído pelos pontos defeituosos, ordenado de forma que todos os pontos pertencentes ao mesmo defeito fiquem juntos. Finalmente, o último vector indica a posição de cada defeito no vector anterior, funcionando como um apontador. Será necessária uma matriz de dimensão idêntica à imagem original, para serem marcados os pontos já processados.

Atendendo à Figura 8.67, no final do algoritmo obtém-se a stack vazia,  $n$  pontos

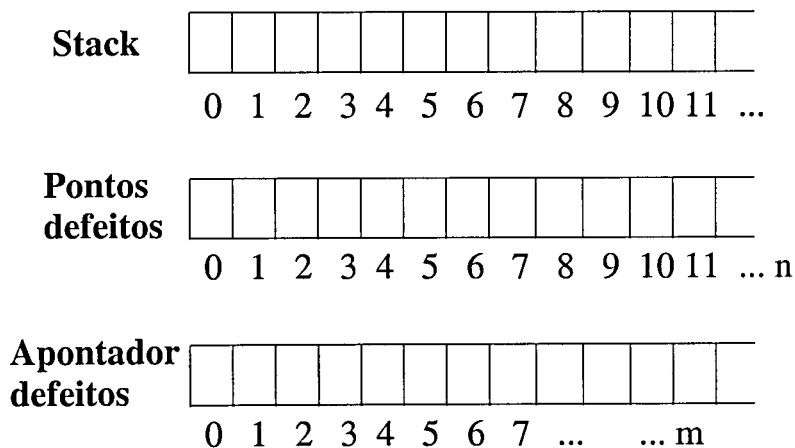


Figura 8.67 Memória necessária para algoritmo detecção defeitos

defeituosos e  $m$  defeitos, claro que um defeito é constituído por um ou mais pontos escuros (defeituosos). Um ponto é considerado defeito se a sua intensidade for inferior a um *threshold*, tal como na binarização (Cap. 8.2).

O presente algoritmo pode ser facilmente descrito através do Diagrama 8.2. A imagem começa por ser varrida iniciando-se o processo até ser encontrado um ponto defeituoso. Aí, são seguidos todos os vizinhos até se esgotarem, completando assim a lista de pontos do primeiro defeito. O varrimento continua até ao próximo defeito que ainda não foi processado dando-se origem a uma nova pesquisa de vizinhos defeituosos e assim sucessivamente.

Para se conhecerem os limites físicos de cada defeito, será necessário varrer todos os pontos defeituosos, para cada defeito, e encontrar as coordenadas  $x$  e  $y$  máximas e mínimas que podem ser guardadas num novo vector contendo as coordenadas dos pontos limites do rectângulo assim como o número de pontos defeituosos. O restante processamento será baseado neste vector que contém, de uma forma genérica, informação de todos os defeitos constituintes da superfície da rolha.

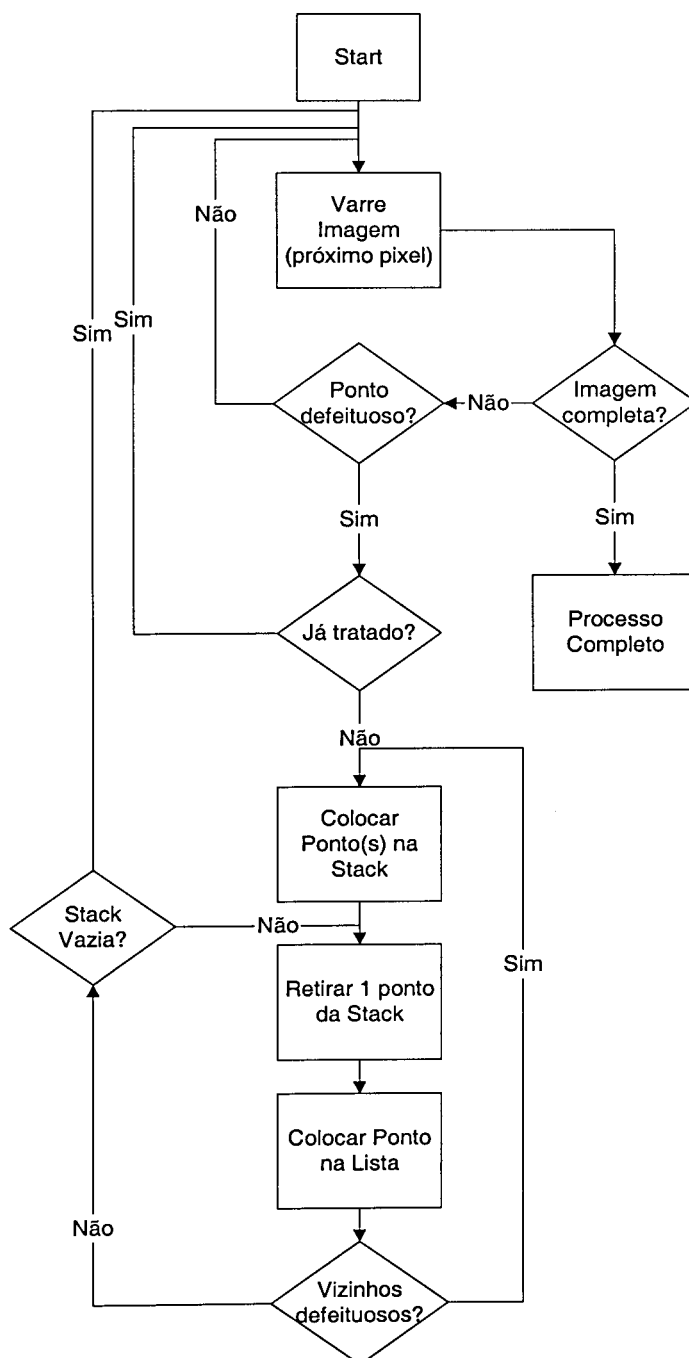


Diagrama 8.2 Algoritmo da função "get\_blob"

### 8.5.2 Resultados do algoritmo detecção de defeitos

Para medir a eficácia do algoritmo de detecção de defeitos isolados, foram testadas várias imagens de superfícies de rolhas de cortiça, entre as quais algumas são apresentadas como resultados. Genericamente, uma imagem adquirida tomará a forma da Figura 8.68. Efectuando um processo de binarização obtém-se a Figura 8.69. Utilizando esta última como imagem a detectar os defeitos, resultou a Figura 8.70, onde todos os defeitos estão circunscritos a rectângulos amarelos, os defeitos que coincidem na primeira linha e na última estão circunscritos a rectângulos vermelhos<sup>12</sup>, a rolha está delimitada por um rectângulo verde e todos os pontos tratados estão desenhados a azul. Como resultado algébrico, são conhecidas as coordenadas dos rectângulos, de cada ponto que constitui cada defeito, assim como o número total de defeitos e de pontos defeituosos.

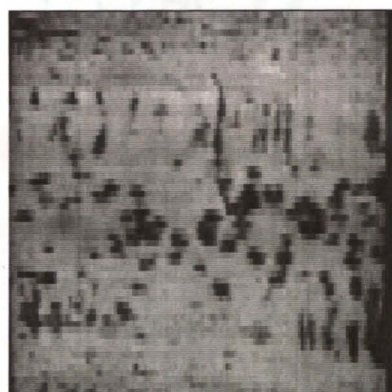


Figura 8.68 Imagem de teste

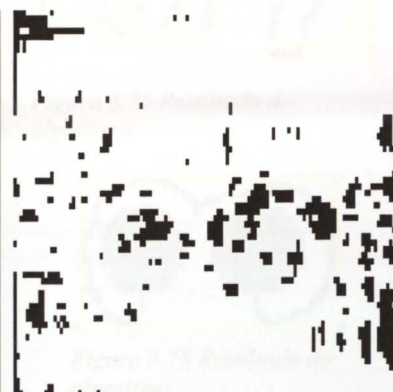


Figura 8.69 Imagem de teste - binarização

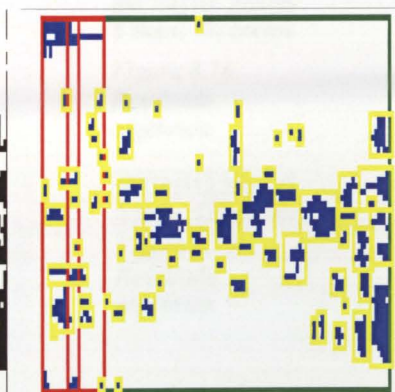


Figura 8.70 Resultado do algoritmo

É certo que neste caso, o tamanho dessa informação é grande, mas um teste com uma imagem mais simples e com menos pontos, portanto mais facilmente apresentados os resultados, está apresentada nas Figuras 8.71 a 8.73. Algebricamente, os resultados são três defeitos (designados no software por “blob”) com as respectivas coordenadas<sup>13</sup> e número de pontos defeituosos em cada defeito como indicado na Figura 8.73.

<sup>12</sup> O facto da rolha ser cilíndrica, acarreta que, na imagem, a última linha da superfície da rolha seja ligada à primeira

<sup>13</sup> A referência dos eixos  $xy$  é semelhante a um ecrã, ou seja no canto superior esquerdo,  $x$  horizontal e  $y$  vertical.

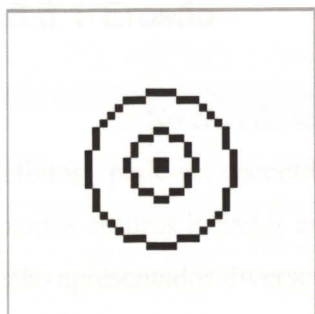


Figura 8.71 Imagem de teste

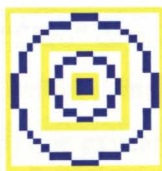


Figura 8.72 Resultado do algoritmo

(112,11),(131,31)=54  
 (117,16),(126,25)=24  
 (121,20),(122,21)=4  
 3 blobs; 82 pontos

Figura 8.73  
Resultado algébrico

De um modo geral, apresentam-se vários testes efectuados ao algoritmo, todos bem sucedidos.

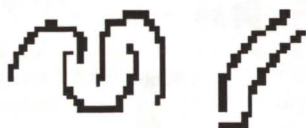


Figura 8.74 Imagem de teste

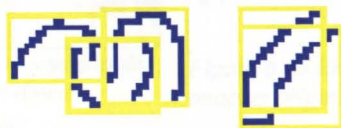


Figura 8.75 Resultado do algoritmo

(94,11),(106,25)=39  
 (117,11),(129,26)=27  
 (78,12),(92,21)=31  
 (117,14),(132,29)=30  
 (88,16),(101,26)=35  
 5 blobs; 162 pontos

Figura 8.76  
Resultado algébrico

Figura 8.77 Imagem de teste

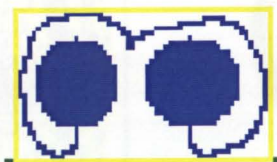


Figura 8.78 Resultado do algoritmo

(60,8),(112,38)=727  
 1 blobs; 727 pontos

Figura 8.79  
Resultado algébrico

ABC

Figura 8.80  
Imagem de testeFigura 8.81  
Resultado do algoritmo

(70,11),(79,22)=41  
 (82,11),(90,22)=71  
 (94,11),(102,22)=38  
 3 blobs; 150 pontos

Figura 8.82  
Resultado algébrico

## 8.6 Aplicação do algoritmo de detecção de defeitos/manchas

O algoritmo de detecção de defeitos poderá ser aliado a outros processamentos, como exemplo, à dilatação, à erosão, à abertura, ao fecho ou até à convolução. Assim serão detectados apenas os defeitos desejados.

### 8.6.1 Erosão

No caso de ser aplicado um “filtro” de erosão (Cap. 8.3.1) seguindo-se a detecção de defeitos, pode-se encontrar apenas os defeitos maiores, eliminando assim eventuais ruídos (pontos escuros isolados em fundo branco) que existam derivados da aquisição. Como resultados, estão apresentados diversos testes nas Figuras 8.83 a 8.90.



Figura 8.83 Imagem original

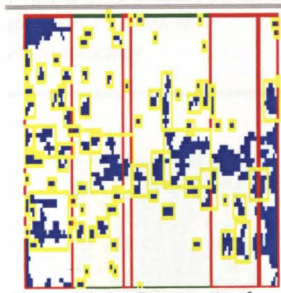


Figura 8.84 Detecção de defeitos (88 defeitos encontrados)

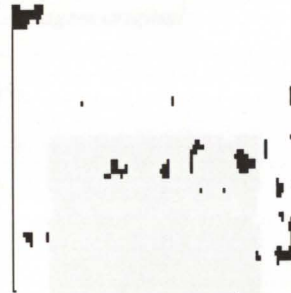


Figura 8.85 Erosão da imagem original

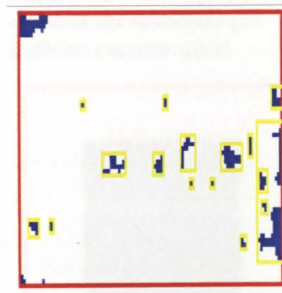


Figura 8.86 Detecção de defeitos da erosão (17 defeitos encontrados)

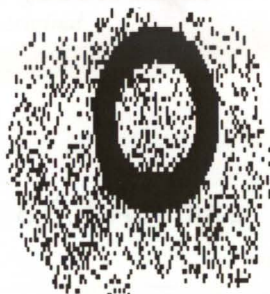


Figura 8.87 Imagem original

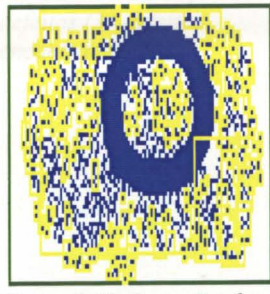


Figura 8.88 Detecção de defeitos (239 defeitos encontrados)

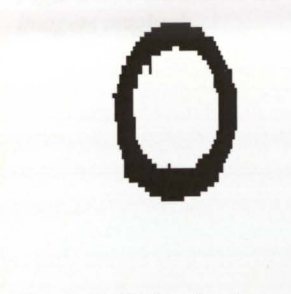


Figura 8.89 Erosão da imagem original

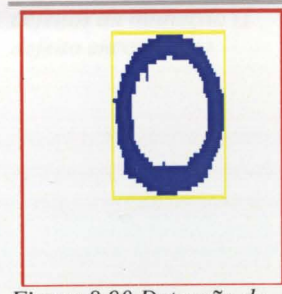


Figura 8.90 Detecção de defeitos da erosão (1 defeito encontrado)

### 8.6.2 Dilatação

No caso de ser aplicado um “filtro” de dilatação (Cap. 8.3.1) seguindo-se a detecção de defeitos, podem-se detectar os defeitos de menor dimensão, alargando-os, e ligar defeitos próximos. No caso de existirem ruídos devidos à aquisição (pontos brancos isolados em fundo preto) serão também eliminados. Os resultados estão apresentados nas Figuras 8.91 a 8.98.

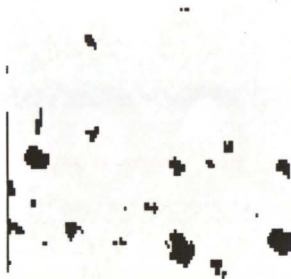


Figura 8.91 Imagem original

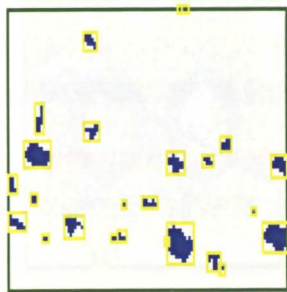


Figura 8.92 Detecção de defeitos (23 defeitos encontrados)

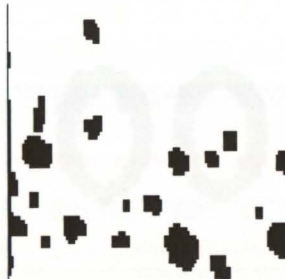


Figura 8.93 Dilatação da imagem original

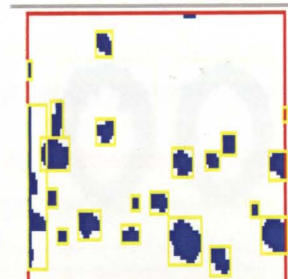


Figura 8.94 Detecção de defeitos da dilatação (21 defeitos encontrados)

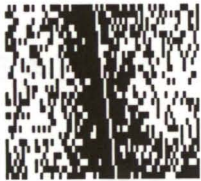


Figura 8.95 Imagem original

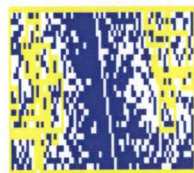


Figura 8.96 Detecção de defeitos (39 defeitos encontrados)

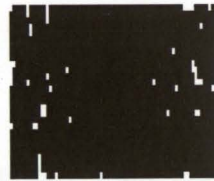


Figura 8.97 Dilatação da imagem original

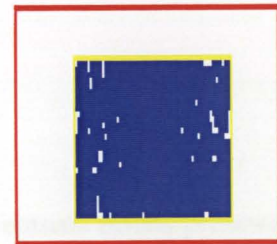


Figura 8.98 Detecção de defeitos da dilatação (1 defeito encontrado)

### 8.6.3 Abertura

No caso de ser aplicado um “filtro” de abertura (Cap. 8.3.2) seguindo-se a detecção de defeitos, obtém-se imunidade ao ruído sem ser afectado pela diminuição de área defeituosa. Como teste, foi desenhada uma figura de duas circunferências separadas mas ambas atravessadas por uma linha recta (de espessura igual a dois pixels) que as une. Para além disso, foi adicionado à imagem ruído (pontos pretos) com a finalidade de testar a abertura (Figura 8.99). Como se esperava, um elevado número de defeitos pode ser encontrado após a utilização do algoritmo em causa. Utilizando a abertura, todo o ruído é eliminado e as circunferências são separadas (a recta desaparece), como se pode observar na Figura 8.101 que dá origem aos dois defeitos distintos encontrados (Figura 8.102).

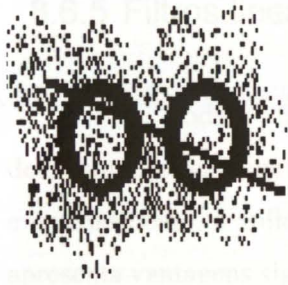


Figura 8.99 Imagem original

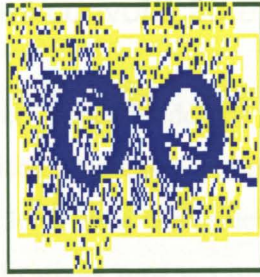


Figura 8.100 Detecção de defeitos (224 defeitos encontrados)

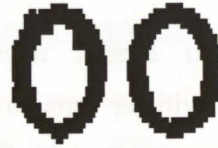


Figura 8.101 Abertura da imagem original

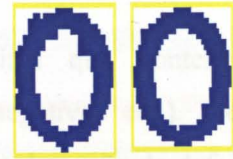


Figura 8.102 Detecção de defeitos na abertura (2 defeitos encontrados)

### 8.6.4 Fecho

Semelhante à abertura, o fecho da imagem permite filtrar eventuais ruídos presentes na imagem, mas neste caso, pontos brancos em fundo preto, unindo todos os objectos que se encontrem separados por distâncias inferiores ou iguais a dois pixeis. Como exemplo foram desenhadas duas circunferências cujos centros distam entre si menos do dobro do raio. Foi traçada uma linha horizontal, que divide o objecto em duas partes. Para além disso, foi introduzido ruído (pontos brancos) no objecto (Figura 8.103). A detecção de defeitos está indicada na Figura 8.104 onde foram encontrados 2 defeitos. A imagem fechada está representada na Figura 8.105 onde o ruído desapareceu, e o objecto ficou completamente ligado, concluindo na Figura 8.106 a detecção de um só defeito.



Figura 8.103 Imagem original



Figura 8.104 Detecção de defeitos (2 defeitos encontrados)



Figura 8.105 Fecho da imagem original

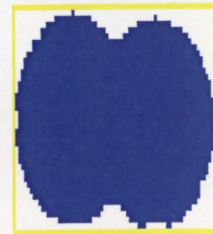


Figura 8.106 Detecção de defeitos no fecho (1 defeito encontrado)

### 8.6.5 Filtros lineares:convolução e detecção de orlas

Poderá haver necessidade de detectar apenas os defeitos que contenham determinadas características (direcção, forma, gradiente positivo ou negativo, etc.). Neste enquadramento, a aplicação de uma convolução 2-D (Cap. 8.1), seguida da detecção de defeitos apresenta vantagens significativas, uma vez que permite detectar apenas os defeitos pretendidos.

Uma vez que o algoritmo desenvolvido detecta defeitos pretos em fundo branco e que normalmente o resultado das convoluções é uma imagem escura com os pontos distintos a claro, torna-se necessário inverter a imagem, como o caso da solução adoptada.

Como teste foi utilizada a imagem ilustrada na Figura 8.107 cujos defeitos se encontram representados na Figura 8.108.

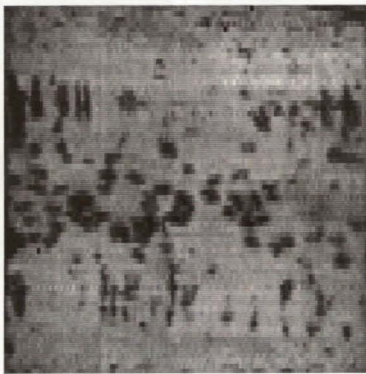


Figura 8.107 Imagem de teste

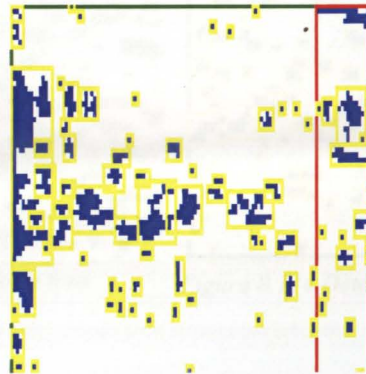


Figura 8.108 Detecção de defeitos

Foram testadas as máscaras de Prewitt segundo a detecção do gradiente de linhas e colunas indicadas, respectivamente, nas Figuras 8.109 e 8.112. Nas Figuras 8.110 e 8.113 estão representadas as imagens com tons invertidos permitindo a actuação do algoritmo de detecção de defeitos, representado nas Figuras 8.111 e 8.114.

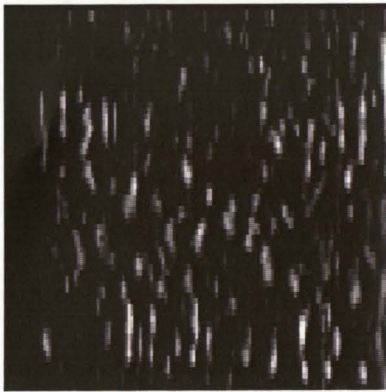


Figura 8.109 Convolução (Prewitt-linhas)

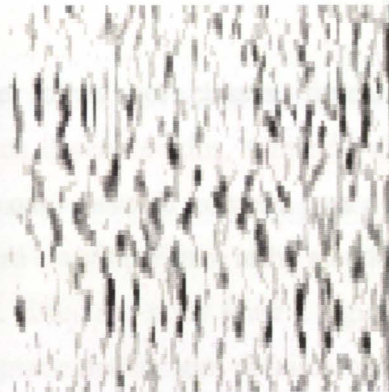


Figura 8.110 Inversão dos tons

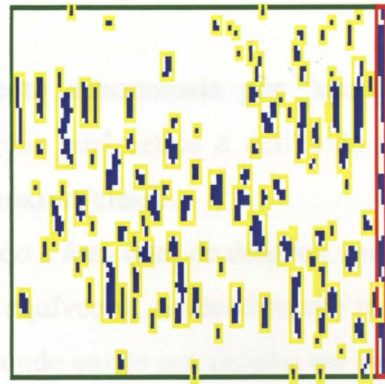


Figura 8.111 Detecção de defeitos

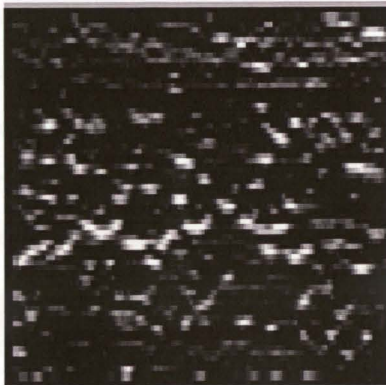


Figura 8.112 Convolução (Prewitt-colunas)

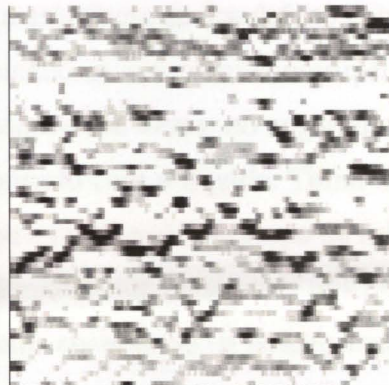


Figura 8.113 Inversão de tons

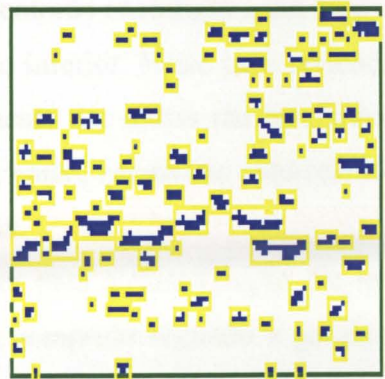


Figura 8.114 Detecção de defeitos

## 9 Aplicação do Processamento de imagem digital

A classificação de rolhas por classes, tipicamente denominada por “escolha”, poder-se-à basear nos algoritmos desenvolvidos, tomando alguns parâmetros e definindo para cada classe um limite superior o qual serve de fronteira para a próxima classe.

A primeira ideia será classificar uma rolha atendendo à área total de defeitos, ou seja o número de pixels defeituosos. Este caso pode levar a alguns equívocos, nomeadamente rolhas que contenham uma superfície praticamente sem defeitos mas onde existe um defeito em forma de linha que liga os dois topos. É certo que uma rolha deste tipo não desempenhará a sua função: vedar líquidos. Outro caso será a existência de um defeito concentrado encostado a um topo. Por vezes as rolhas são cortadas, obtendo-se assim um comprimento inferior. Neste caso pretende-se cortar o topo mais defeituoso. Muitas das vezes, no engarrafamento das rolhas são escolhidos os melhores topos para ficar em contacto com o líquido. Torna-se, então, necessário conhecer todos os defeitos assim como o seu tipo e localização no corpo da rolha.

Assim, alguns parâmetros que podem ser utilizados para a classificação das rolhas serão a área total, o maior defeito encontrado, o defeito mais comprido segundo a geratriz da rolha, assim como o perpendicular. Por vezes o comprimento da rolha é também crucial para a classificação, na medida em que as rolhas têm que conter dimensões precisas e limitadas a intervalos rigorosos, já documentado no Cap. 7.1.1.

### 9.1 Precisão das medidas adquiridas

Um dilema é levantado neste ponto: deverão ser consideradas as medidas em pixels ou milímetros? É certo que a medida em milímetros é relacionada com os pixels. Horizontalmente, é proporcional segundo uma constante definida (Cap 4.4.1), mas verticalmente depende da velocidade de rotação. Assim, para velocidades de rotação diferentes, o mesmo defeito terá um número de pixels diferentes, mas uma medida em milímetros semelhante. Logo, a parametrização por milímetros torna-se vantajosa uma vez que é imune às variações de velocidade de rotação da rolha.

### 9.1.1 Resultados da aquisição de medidas

Para efectuar um teste à variação dos resultados em milímetros e pixeis com a variação da velocidade de aquisição da imagem foram adquiridas duas imagens, a velocidades diferentes, e representados os resultados de área total defeituosa, maior defeito concentrado, maior fenda horizontal e vertical em pixeis e milímetros.

No primeiro caso (Figura 9.1) a imagem foi adquirida com uma velocidade que implica a necessidade de leitura de 45 linhas para completar toda a imagem. No segundo caso, a Figura 9.2, foi adquirida com uma velocidade de rotação 35% inferior. Neste caso, a imagem está completamente varrida na linha 70, como indicado nas Figuras 9.3 e 9.4. Como é óbvio, o número de pontos considerados defeitos (relacionados com a vertical) no segundo caso é maior. Por exemplo, o número total de pontos defeituosos no primeiro caso é de 556 enquanto que no segundo caso é de 866. As diferenças encontram-se nomeadamente nos defeitos totais, máximos defeitos, e fendas verticais. É certo que a velocidade de rotação não influencia a medida das fendas horizontais como se pode verificar nas Figuras 9.5 e 9.6, onde ambas indicam o tamanho horizontal da maior fenda de 13 pixeis, e nas Figuras 9.7 e 9.8 onde a mesma média é apresentada em milímetros (4,64 mm).

As variações em percentagem encontram-se apresentadas Tabela 9.1.

	<i>Variação em pixeis (%)</i>	<i>Variação em mm (%)</i>
<b>Nº pontos defeituosos</b>	55,70%	0,10%
<b>Máximo defeito</b>	46,50%	-5,80%
<b>Máxima fenda horizontal</b>	0,00%	0,00%
<b>Máxima fenda vertical</b>	55,00%	-0,40%

*Tabela 9.1 Variação de medidas efectuadas em função da velocidade (-35%)*

Pode-se considerar que o algoritmo necessário para transformar pixeis em milímetros, é uma camada de software, que permite ao programador “abstrair-se” da velocidade de rotação da rolha. Como consideração final, o uso das medidas em milímetros face aos pixeis é vantajoso e imune às variações exteriores da velocidade. Note-se que se a rolha for colocada a rodar através de rolos pode sofrer de deslizamento, que é incontroável de outra forma.

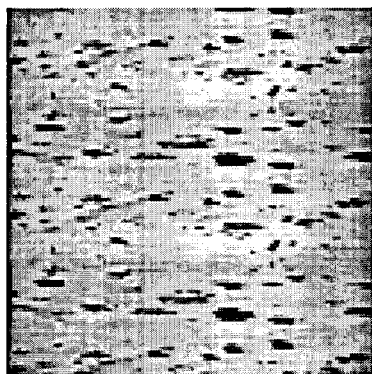


Figura 9.1 Imagem de teste (alta velocidade)

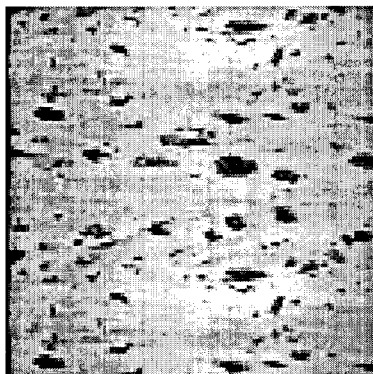


Figura 9.2 Imagem de teste (baixa velocidade)

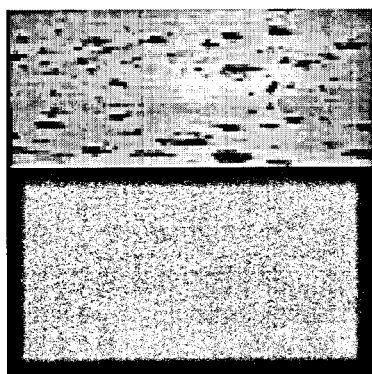


Figura 9.3 Imagem de teste (alta velocidade) delimitada (linha 45)

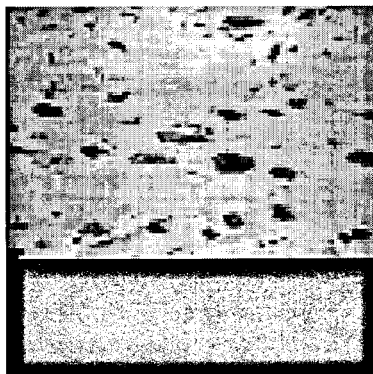


Figura 9.4 Imagem de teste (baixa velocidade) delimitada (linha 70)

556 Points  
 Max=71(170,24),(179,37)  
 Max.X=13(124,41),(136,44)  
 Max.Y=20(55,27),(66,1)

Figura 9.5 Detecção de defeitos em pixels

866 Points  
 Max=104(170,15),(179,33)  
 Max.X=13(127,4),(139,6)  
 Max.Y=31(55,20),(66,50)

Figura 9.6 Detecção de defeitos em milímetros

Max X=4,64 mm  
 Max Y=34,21 mm  
 Max Area=43,35 mm<sup>2</sup>  
 Total Area= 339,50 mm<sup>2</sup>

Figura 9.7 Detecção de defeitos em pixels

Max X=4,64 mm  
 Max Y=34,09 mm  
 Max Area=40,82 mm<sup>2</sup>  
 Total Area= 339,90 mm<sup>2</sup>

Figura 9.8 Detecção de defeitos em milímetros

## 9.2 Resultados da distribuição directa das classes

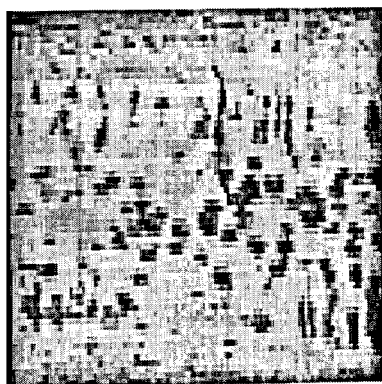
Tomando, inicialmente, como parâmetros para classificação das rolhas a área total de defeitos, o maior defeito, a maior fenda horizontal e vertical, poder-se-à configurar uma tabela (Tabela 9.2) onde estão definidos os limites admissíveis para cada classe, expressos em

milímetros.

	<i>Extra</i>	<i>Sup.</i>	<i>1°</i>	<i>2°</i>	<i>3°</i>	<i>4°</i>	<i>5°</i>	<i>6°</i>
Área Total (mm <sup>2</sup> )	80	150	320	590	760	1000	1500	2000
Maior defeito (mm <sup>2</sup> )	30	55	80	100	170	245	320	500
Fenda Horizontal(mm)	2	5	7	11	15	20	28	35
Fenda Vertical(mm)	12	23	34	43	50	59	64	70

*Tabela 9.2 Exemplo de configuração de parâmetros*

Utilizando uma rolha de teste, Figura 9.9, a sua classificação tomada em função da tabela de parametrização exemplo (Tabela 9.2), poder-se-à determinar comparando os valores obtidos da rolha (Figura 9.10) com a tabela, atribuindo-lhe uma classe. Assim, segundo o parâmetro área total,  $571.80 < 590$ , logo a classe atribuída seria 2°. Quanto ao parâmetro maior defeito,  $153.50 < 170$ , logo a classe atribuída seria 3°. Quanto à fenda horizontal,  $11.78 < 15$ , logo obteria a classe 3°. E finalmente, segundo o parâmetro fenda vertical,  $47.65 < 50$ , logo a classe atribuída seria 3°. A classificação final da rolha adquirida seria 3°.



*Figura 9.9 Imagem a classificar*

Max X=11,78 mm  
 Max Y=47,65 mm  
 Max Area=153,50 mm<sup>2</sup>  
 Total Area= 571,80 mm<sup>2</sup>

*Figura 9.10  
 Resultados calculados*

Outro teste efectuado foi a imagem indicada na Figura 9.11 em que a classificação final atribuída seria a 4ª classe.

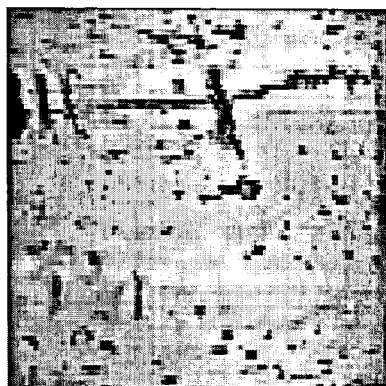


Figura 9.11 Imagem a classificar

Max X=16,07 mm  
 Max Y=21,27 mm  
 Max Area=102,30 mm<sup>2</sup>  
 Total Area= 442,50 mm<sup>2</sup>

Figura 9.12  
 Resultados calculados

De facto, a imagem de teste representada na Figura 9.11, apresenta uma fenda que aparentemente atravessa a superfície da rolha de um topo ao outro, e os resultados, nomeadamente o máximo defeito horizontal, apenas indica 16.07 milímetros (francamente menor que o comprimento da rolha – 45mm). Na realidade, este problema poderá ser ultrapassado utilizando um nível de *threshold* superior, o que acarreta alguns problemas indesejados, como por exemplo, aumentar consideravelmente o número de pontos defeituosos. A solução a este problema consiste em efectuar alguns processamentos na imagem antes de verificar os defeitos existentes. O capítulo 9.3 efectua uma abordagem à resolução deste problema.

### 9.3 Resultados da distribuição das classes após processamento

Com a finalidade de “salientar” certas topologias de defeitos, poder-se-à efectuar um prévio processamento antes da detecção de defeitos. Este processamento poderá ser uma convolução da imagem por uma certa máscara ou o processamento morfológico de imagem digital (Cap. 8.3).

No caso de uma imagem ruidosa, o processamento morfológico de imagem digital poderá ser vantajoso (abertura ou fecho da imagem). No caso da Figura 9.11, a fenda que supostamente atravessaria toda a superfície, e que na realidade não acontece, após uma dilatação poder-se-à obter a fenda horizontal com um tamanho idêntico ao comprimento da rolha.

A Figura 9.14 apresenta um processo de dilatação da Figura 9.13. Obviamente que a fenda apresenta uma dimensão maior (atravessa toda a superfície), assim como todos os defeitos. Genericamente pode-se observar que o número de pontos defeituosos aumentou consideravelmente, como indicado na Tabela 9.3.

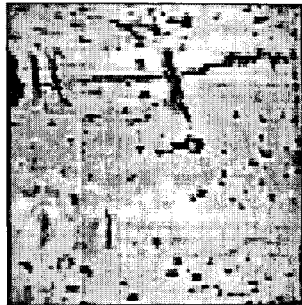


Figura 9.13 Imagem de teste

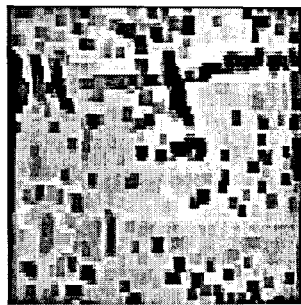


Figura 9.14 Imagem de teste Dilatada

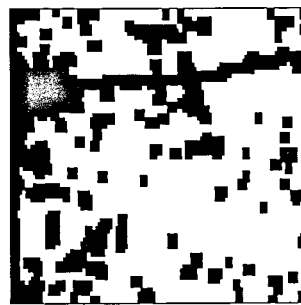


Figura 9.15 imagem de teste Dilatada Binarizada

Max X=44,27 mm  
 Max Y=76,97 mm  
 Max Area=525,00 mm<sup>2</sup>  
 Total Area= 1.132,00 mm<sup>2</sup>  
 Figura 9.16 Detecção de defeitos da Figura 9.14

	<i>Variação em mm (%)</i>
Nº pontos defeituosos	155,80%
Máxima fenda horizontal	Comprimento da rolha

Tabela 9.3 *Variação das dimensões dos defeitos com a Dilatação da imagem*

É certo que com a pontuação obtida (Figura 9.16), a classe atribuída segundo a parametrização (Tabela 9.2) seria 6°. A dilatação apresenta um aumento considerável na detecção de defeitos de uma superfície. Uma solução será a utilização de uma imagem “fechada” (Cap. 8.3.2) para a detecção de defeitos, que permite ligar pontos separados e não aumentar significativamente o número de pontos defeituosos. A Figura 9.17 ilustra a mesma imagem de teste sujeita agora ao fecho (Figura 9.18), cuja representação a preto e branco está indicada na Figura 9.19. A comparação dos resultados obtidos do fecho (Figura 9.20) com a imagem normal (Figura 9.12) está representada na Tabela 9.4.

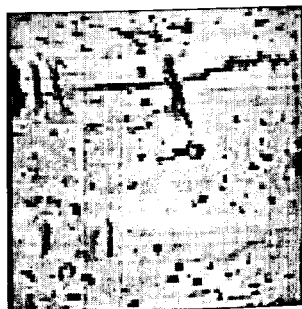


Figura 9.17 Imagem de teste

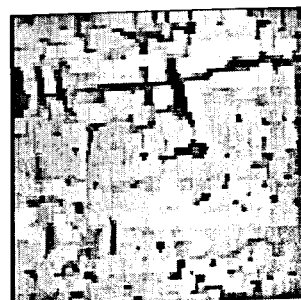


Figura 9.18 Imagem de teste Fechada



Figura 9.19 Imagem de teste Fechada Binarizada

Max X=44,27 mm  
 Max Y=35,45 mm  
 Max Area=233,60 mm<sup>2</sup>  
 Total Area= 541,60 mm<sup>2</sup>  
 Figura 9.20 Detecção de defeitos da Figura 9.18

	<i>Varição em mm (%)</i>
<b>Nº pontos defeituosos</b>	22,40%
<b>Máxima fenda horizontal</b>	Comprimento da rolha

*Tabela 9.4 Variação das dimensões dos defeitos com o Fecho da imagem*

Finalmente, outro processo que pode ser utilizado, consiste na convolução da imagem por uma máscara que faça realçar os defeitos pretendidos. Assim, para um defeito do tipo fenda horizontal, podem-se aplicar máscaras do tipo indicado nas Equações 9.1 e 9.2.

$$Mask Lap = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

$$Mask Lap = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

No caso de ser pretendido salientar as fendas verticais, o uso da convolução pelas máscaras indicadas nas Equações 9.3 e 9.4 poderá ser vantajosa.

$$Mask Lap = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9.3)$$

$$Mask Lap = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9.4)$$

O resultado da aplicação da convolução da imagem com a máscara da Equação 9.1 está representado nas Figuras 9.22 a 9.24.



Figura 9.21 Imagem de teste

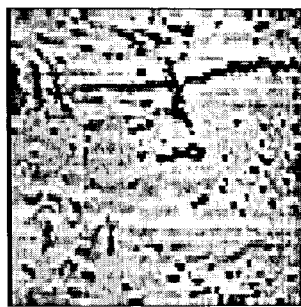


Figura 9.22 Imagem de teste com convolução pela Equação 9.1

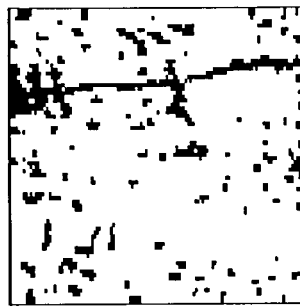


Figura 9.23 Binarização da Figura 9.22

Max X=44,27 mm  
Max Y=18,23 mm  
Max Area=171,70 mm<sup>2</sup>  
Total Area= 430,20 mm<sup>2</sup>

Figura 9.24 Detecção de defeitos da Figura 9.22

Na realidade o resultado prático é bastante melhor face a qualquer processamento de dilatação ou fecho da imagem. A convolução permite obter a fenda horizontal a atravessar toda a imagem sem que por isso, os restantes defeitos sejam alterados significativamente. As diferenças estão apresentadas na Tabela 9.5.

	<i>Varição em mm (%)</i>
<b>Nº pontos defeituosos</b>	-2,80%
<b>Máxima fenda horizontal</b>	Comprimento da rolha

Tabela 9.5 Varição das dimensões dos defeitos com a Convolução pela Equação 9.1

## 9.4 Fiabilidade de resultados – Estudo estatístico de amostras

Um estudo estatístico foi efectuado com um número significativo de amostras (cerca de 256) em cada um dos três testes. A média, o desvio padrão, o histograma com a distribuição dos resultados e a respectiva distribuição normal estão apresentados seguidamente, para cada imagem de teste.

### 9.4.1 Teste 1

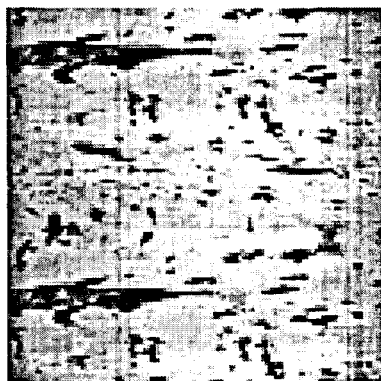


Figura 9.25 Rolha geradora de amostras – teste 1

- Área defeituosa

$$\bar{x} = 333.40 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = 6.83 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = 2.65 \%$$

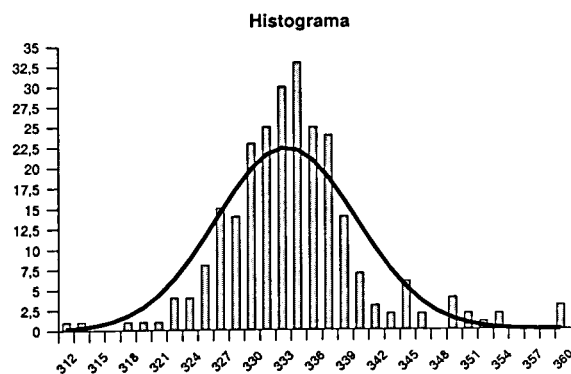


Gráfico 9.1 Histograma da área defeituosa - teste 1

- Máximo defeito

$$\bar{x} = 140.77 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = 6.37 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = 4.53 \%$$

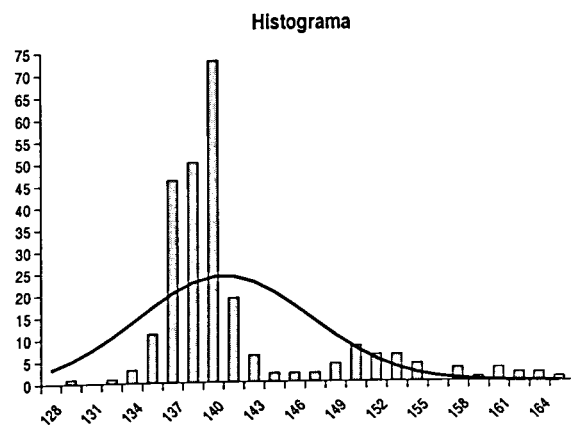


Gráfico 9.2 Histograma do defeito máximo - teste 1

- **Fenda horizontal**

$$\bar{x} = 19.84 \text{ mm}$$

$$\sigma = 0.19 \text{ mm}$$

$$\sigma = 0.96 \%$$

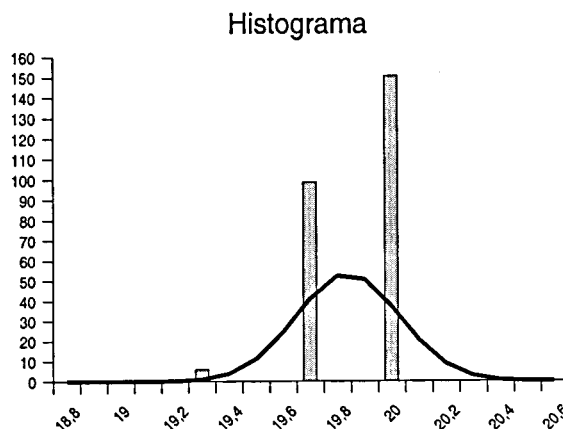


Gráfico 9.3 Histograma da máxima fenda horizontal – teste 1

- **Fenda vertical**

$$\bar{x} = 24.37 \text{ mm}$$

$$\sigma = 2.37 \text{ mm}$$

$$\sigma = 9.73 \%$$

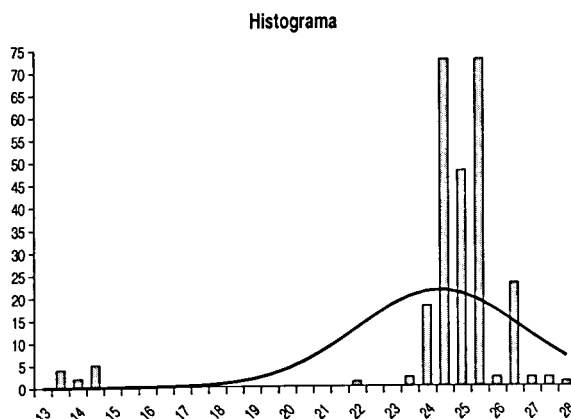


Gráfico 9.4 Histograma da máxima fenda vertical – teste 1

9.4.2 Teste 2

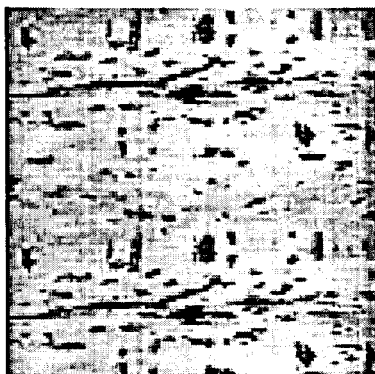


Figura 9.26 Rolha geradora de amostras – teste 2

- Área defeituosa

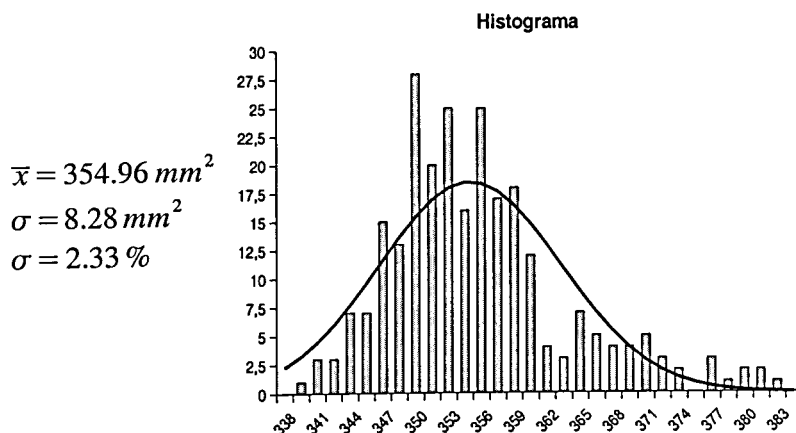


Gráfico 9.5 Histograma da área defeituosa – teste 2

- Máximo defeito

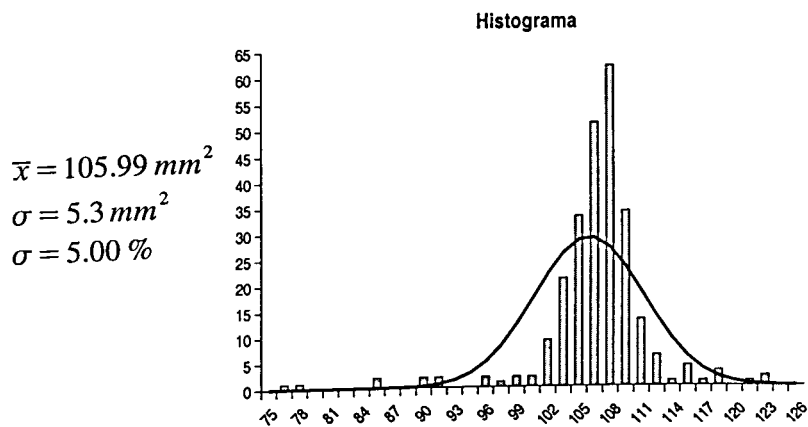


Gráfico 9.6 Histograma do defeito máximo – teste 2

• Fenda horizontal

$$\bar{x} = 26.28 \text{ mm}$$

$$\sigma = 0.26 \text{ mm}$$

$$\sigma = 0.99 \%$$

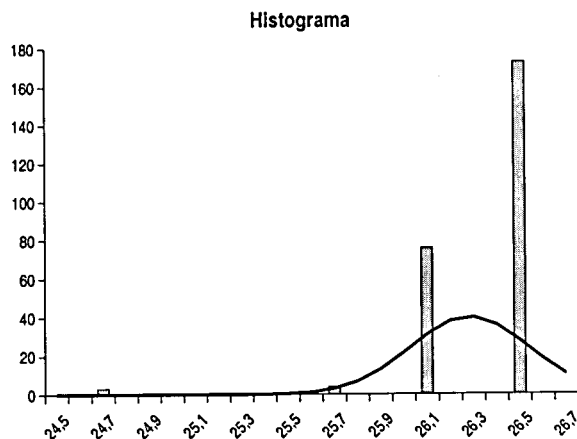


Gráfico 9.7 Histograma da máxima fenda horizontal - teste 2

• Fenda vertical

$$\bar{x} = 17.25 \text{ mm}$$

$$\sigma = 0.72 \text{ mm}$$

$$\sigma = 4.17 \%$$

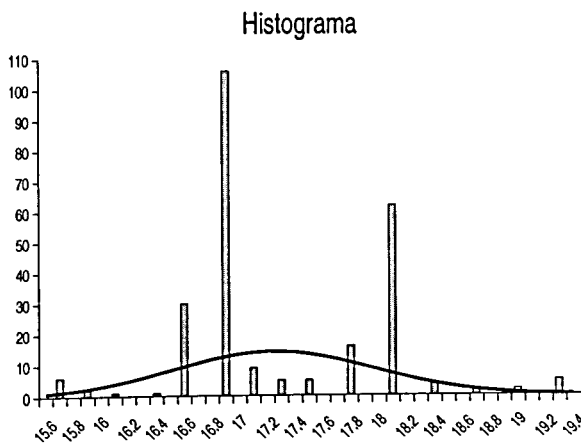


Gráfico 9.8 Histograma da máxima fenda vertical - teste 2

### 9.4.3 Teste 3

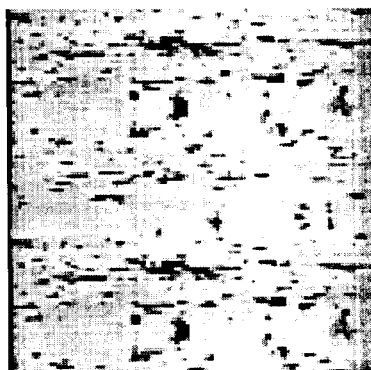


Figura 9.27 Rolha geradora de amostras – teste 3

- Área defeituosa

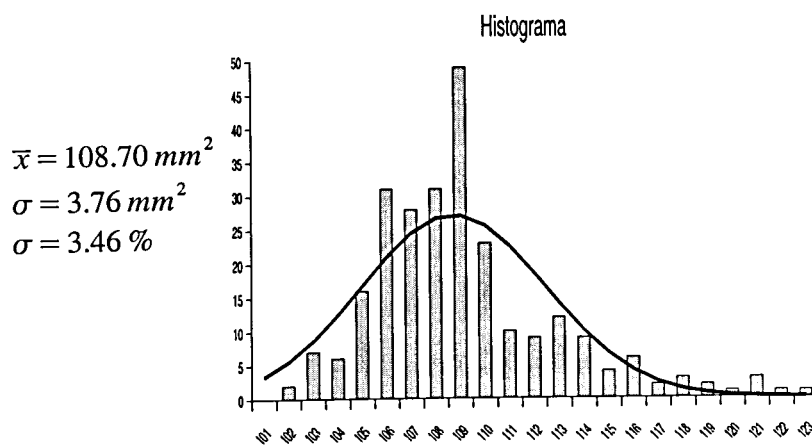


Gráfico 9.9 Histograma da área defeituosa - teste 3

- Máximo defeito

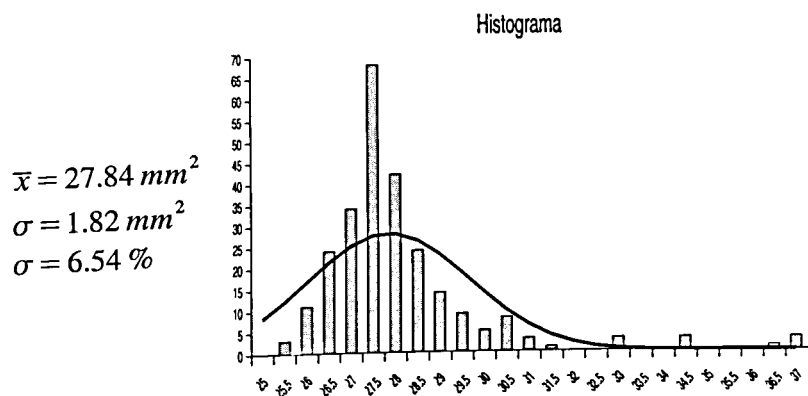


Gráfico 9.10 Histograma do defeito máximo – teste 3

- Fenda horizontal

$$\bar{x} = 8.33 \text{ mm}$$

$$\sigma = 0.20 \text{ mm}$$

$$\sigma = 2.40 \%$$

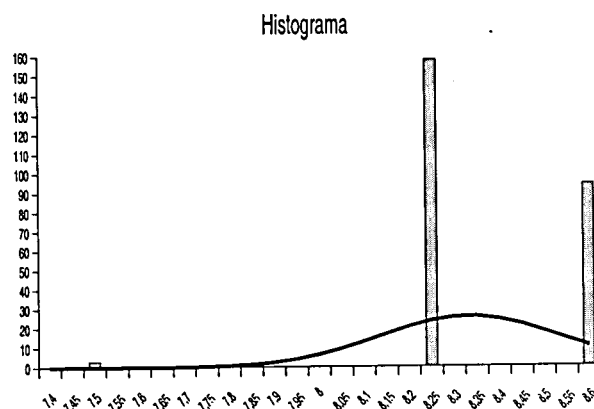


Gráfico 9.11 Histograma da máxima fenda horizontal – teste 3

- Fenda vertical

$$\bar{x} = 8.43 \text{ mm}$$

$$\sigma = 0.53 \text{ mm}$$

$$\sigma = 6.29 \%$$

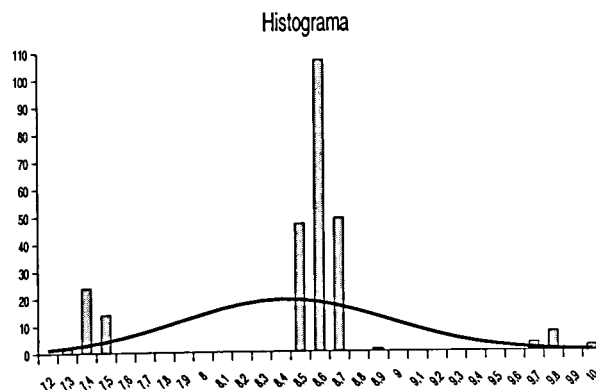


Gráfico 9.12 Histograma da máxima fenda vertical - teste 3

#### 9.4.4 Conclusões

Alguns gráficos apresentam diferenças consideráveis entre as amostras e a distribuição normalizada. Este facto deve-se, essencialmente, aos pontos que estão na fronteira do *threshold*, e que qualquer variação de luz, faz atribuir ao ponto quer o lado preto quer o branco. Aparentemente, esta indecisão não acarreta grande variação no final, o que é falso. Na realidade, podem existir dois defeitos que estejam separados por zonas cujas intensidades estejam “indecisas” face ao *threshold*. Como resultado, os defeitos podem ser ligados algumas vezes e outras não conforme a luminosidade, o que leva a aparecerem resultados com alguma diferença. É

certo que este tipo de diferenças é mais visível nas fendas (horizontais ou verticais) e menos perceptível na área total defeituosa. Um processamento que poderá eventualmente diminuir este problema é efectuar um fecho (Cap. 8.3.2) na imagem antes da detecção de defeitos.

## 9.5 Processamento em tempo real

Sob o ponto de vista dos requisitos temporais, o processamento de imagem descrito nos capítulos anteriores demora cerca de 20 a 30 ms, num processador Pentium™ Celeron™ a 1 GHz com o sistema operativo Windows XP™.

É certo que o sistema operativo em causa não garante os requisitos temporais, sendo por isso mau sob ponto de vista do processamento em tempo real. Na realidade, a opção de um sistema operativo em tempo real (ex: QNX, RTLinux, VxWorks, Lynx, ...), acarretaria custos mais elevados. Uma vez que a aquisição de dados é efectuada via rede Ethernet (pacotes UDP), seria fácil emigrar a aplicação de software para outras plataformas que garantissem o cumprimento de requisitos temporais.

Sob ponto de vista industrial, também se torna complicado que o sistema mecânico manipule os objectos com uma velocidade tal que seja necessário um processamento mais rápido.

## 10 Conclusões

### 10.1 Trabalho desenvolvido

O trabalho desenvolvido permite adquirir e processar imagens que provêm de superfícies de rolhas de cortiça natural. A aquisição de imagem foi desenvolvida utilizando como base a rede Ethernet, abrindo assim as portas à escolha do sistema operativo, ambientes de desenvolvimento, hardware utilizado, etc. Foi desenvolvida uma câmara de CCD linear que permite efectuar a aquisição de imagens, linha a linha, originando assim uma imagem matricial com uma resolução de 256 pixels e 110 linhas. O sinal de vídeo (luminosidade) é digitalizado através de um conversor analógico-digital de 8 bits que permite obter uma resolução de 256 tons de cinzento.

A imagem introduzida no PC, é processada com o intuito de obter uma classificação qualitativa de uma rolha em causa. Efectivamente, os resultados de cada rolha serão comparados com uma tabela de parâmetros que permitem definir a classificação final.

### 10.2 Trabalho futuro

O projecto poderá sofrer várias evoluções, nomeadamente, a utilização de câmaras com CCDs lineares a cores. Na realidade, existem certos defeitos nas superfícies das rolhas de cortiça natural que por vezes iludem o sistema.

Tipicamente o barro<sup>15</sup>, que é considerado defeito, está presente em algumas rolhas, e apresenta um tom de luz semelhante à restante superfície, não sendo detectado pelo sistema presente (tons de cinzento). O uso de cores na aquisição de imagem permitirá ao processamento de imagem digital uma probabilidade maior de distinguir este tipo de defeitos.

Outro problema existente na aquisição de imagens de superfícies de rolhas de cortiça natural, consiste em certas rolhas possuírem manchas azuladas no seu corpo. As referidas manchas não implicam qualquer tipo de defeito na prática uma vez que permitem a vedação completa da rolha. O sistema de aquisição em causa é, por vezes, iludido pelas manchas sendo detectadas como defeitos. Problema maior é que, normalmente, as manchas azuladas apresentam

---

<sup>15</sup> Um pó da cor da rolha que cobre defeitos escuros é denominado, pelos produtores, de barro.

---

dimensões consideravelmente elevadas, o que acarreta que uma rolha boa decresça, qualitativamente, de classe.

A velocidade de transmissão da imagem via rede ethernet, é suficiente para o caso de estudo. Na realidade, se a aquisição for a cores, a necessidade de introduzir três componentes de cor<sup>16</sup> ficará a implicar uma descida na velocidade de rotação da rolha. Assim, o aumento da velocidade da rede para 100 Mbits/s tornar-se-à crucial.

---

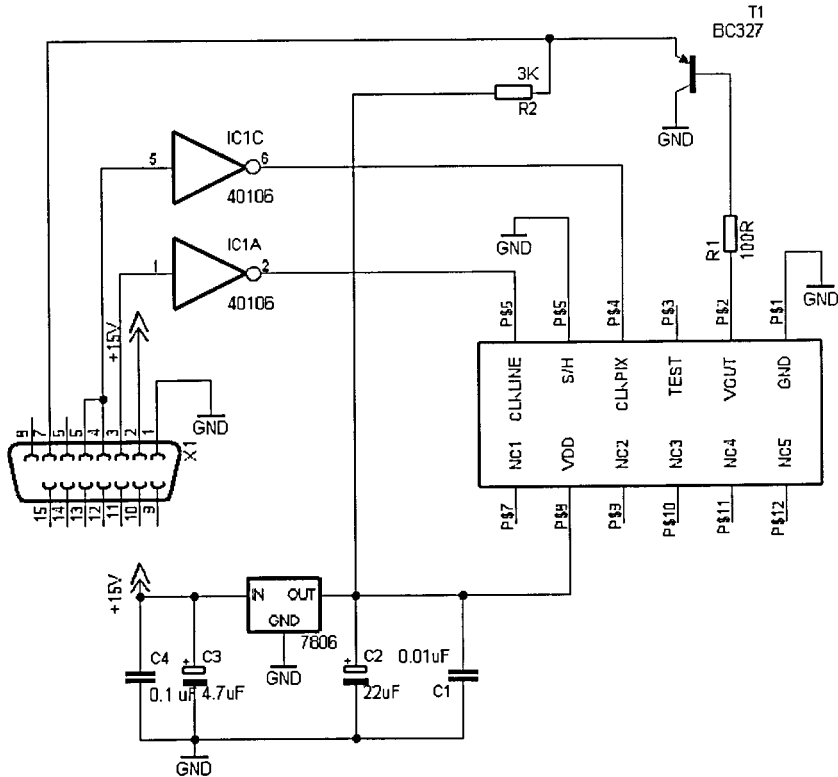
<sup>16</sup> RGB – Vermelho, verde e azul

## Bibliografia

- [1] Sarah Vieni, Mike Jacobs, "Inventors of CCDs Receive IEEE Award", <http://www.bell-labs.com/news/1999/july/13/1.html> .
- [2] Emmanuel P. Baltsavias, "On the performance of photogrammetric scanners", Zurich, 1999.
- [3] Jan FIscher, Vladimir Haasz, Tomás Radil, "Simple Device For Small Dimension Measurement Using CCD Sensor", Czech Republic, 2002.
- [4] Kenneth R. Castleman, "Digital Image Processing", Prentice Hall, 2000 (Pag. 353, 354).
- [5] Luiz Carlos Marques Silva, "Aberração cromática", <http://br.geocities.com/saladefisica5/leituras/abe> .
- [6] Paulo José Cerqueira Gomes da Costa, "Localização em Tempo Real de Múltiplos Robots num Ambiente Dinâmico", Tese Doutorado, FEUP, 1999 (Pag. 50).
- [7] Philips, "High-frequency fluorescent lighting", [http://www.eur.lighting.philips.com/int\\_en/prof/ab](http://www.eur.lighting.philips.com/int_en/prof/ab) .
- [8] W. Richard Stevens, "TCP/IP Illustrated Volume 1 - The Protocols", Addison-Wesley, 1994 (Pag. 1).
- [9] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", Prentice-Hall, 1996 (Pag. 28).
- [10] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", Prentice-Hall, 1996 (Pag. 36).
- [11] W. Richard Stevens, "TCP/IP Illustrated Volume 1 - The Protocols", Addison-Wesley, 1994 (Pag. 6).
- [12] W. Richard Stevens, "TCP/IP Illustrated Volume 1 - The Protocols", Addison-Wesley, 1994 (Pag. 2).
- [13] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", Prentice-Hall, 1996 (Pag. 83).
- [14] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", Prentice-Hall, 1996 (Pag. 84).
- [15] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", Prentice-Hall, 1996 (Pag. 31).
- [16] W. Richard Stevens, "TCP/IP Illustrated Volume 1 - The Protocols", Addison-Wesley, 1994 (Pag. 223).
- [17] W. Richard Stevens, "TCP/IP Illustrated Volume 1 - The Protocols", Addison-Wesley, 1994 (Pag. 224).
- [18] W. Richard Stevens, "TCP/IP Illustrated Volume 1 - The Protocols", Addison-Wesley, 1994 (Pag. 143).
- [19] W. Richard Stevens, "TCP/IP Illustrated Volume 1 - The Protocols", Addison-Wesley, 1994 (Pag. 159).
- [20] Kenneth R. Castleman, "Digital Image Processing", Prentice Hall, 1996 (Pag. 13).
- [21] Arun N. Netravali, Barry G. Haskell, "Digital Pictures - Representation, Compression and Standards", Plenum Press, 1995 (Pag. 96).
- [22] Kenneth R. Castleman, "Digital Image Processing", Prentice Hall, 1996 (Pag. 71).
- [23] William K. Pratt, "Digital Image Processing", Wiley-Interscience, 1991 (Pag. 263).
- [24] Bern Jahne, "Digital Image Processing, Concepts, Algorithms and scientific Applications", Springer, 1997 (Pag. 231).
- [25] Mark Nixon & Alberto Aguado, "Feature Extraction & Image Processing", Newnes, 2002 (Pag. 70).

- 
- [26] Bernd Jahne, "Digital Image Processing, Concepts, Algorithms and scientific Applications", Springer, 1997 (Pag. 211).
- [27] Bern Jahne, "Digital Image Processing, Concepts, Algorithms and scientific Applications", Springer, 1997 (Pag. 99).
- [28] William K. Pratt, "Digital Image Processing", Wiley-Interscience, 1991 (Pag. 503).
- [29] William K. Pratt, "Digital Image Processing", Wiley-Interscience, 1991 (Pag. 286).
- [30] William K. Pratt, "Digital Image Processing", Wiley-Interscience, 1991 (Pag. 518).
- [31] Mark Nixon & Alberto Aguado, "Feature Extraction & Image Processing", Newnes, 2002 (Pag. 76, 77).
- [32] William K. Pratt, "Digital Image Processing", Wiley-Interscience, 1991 (Pag. 449).
- [33] J. Almeida Costa e A. Sampaio e Melo, "Dicionário da Língua Portuguesa", Porto Editora, 1984.
- [34] Kenneth R. Castleman, "Digital Image Processing", Prentice Hall, 1996 (Pag. 471).
- [35] Kenneth R. Castleman, "Digital Image Processing", Prentice Hall, 1996 (Pag. 473).

# Anexo A – Esquema eléctrico da câmara CCD



## Anexo B – Esquema eléctrico do condicionamento de sinal

